



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

## TŘÍOSÝ SNÍMAČ SÍLY

THREE DIMENSIONAL FORCE SENSOR

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Hynek Černý

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Lubomír Houfek, Ph.D.

BRNO 2021



## Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky  
Student: **Hynek Černý**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Lubomír Houfek, Ph.D.**  
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### Tříosý snímač síly

#### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pro dané zatížení navrhnout tříosý snímač síly pracující na principu odporové tenzometrie.

#### Cíle bakalářské práce:

1. Navrhnout koncepci snímače.
2. Spočítat rozměry snímače.
3. Navrhnout tenzometrické zapojení.
4. Vypracovat výrobní výkresy snímače.

#### Seznam doporučené literatury:

JANÍČEK, P., ONDRÁČEK, E., VRBKA, J., BURŠA, J.: Pružnost a pevnost I.  
HOFFMANN, K.: An Introduction to Measurements using SGs.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce se zabývala návrhem snímače sil, který měl měřit síly nezávisle ve třech osách. Požadovaným výstupem práce bylo také vypracování výrobních výkresů. Návrh a optimalizace tvaru a rozměrů snímače probíhala hlavně v programu ANSYS. Důležitou částí práce bylo vyjádření finálních vztahů pro výpočet sil jak analyticky pomocí prosté pružnosti pevnosti, tak také pomocí numerické metody konečných prvků. Poslední částí práce bylo experimentální měření, které mělo ověřit správnost obou postupů při vyjadřování sil a také správnou funkčnost snímače.

## **ABSTRACT**

The bachelor's thesis dealt with the design of a force sensor, which was supposed to do measurements of forces in three axes independently. The another required output of the work was creation of drawings. The design and optimalization of shape and dimensions of the sensor was made mainly in program called ANSYS. An important part of the work was the expression of final relations for the calculation of forces both analytically using simple elastic strength and the numerical finite element method. The last part of the work was an experimental measurement, which was supposed to verify accuracy of both methods for forces expression and also correct functionality of the sensor.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Snímač, síla, snímač sil, pružnost pevnost, přetvoření, napětí, experiment, měření, metoda konečných prvků, MKP, osa, tři osy, ohyb, ohybové napětí, napět'ově deformační analýza

## **KEYWORDS**

Sensor, force, force sensor, elastic and strength, strain, stress, experiment, measuring, finite element method, MKP, axis, three axes, bending, bending stress, stress strain analysis



## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ČERNÝ, Hynek. *Tříosý snímač síly*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132976>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Lubomír Houfek.





## **PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Tříosý snímač síly vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně, dne

-----  
Hynek Černý



## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval svému vedoucímu Ing. Lubomíru Houfkovi Ph.D. za vedení a cenné rady při zpracovávání této závěrečné práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Petrovi Krejčímu Ph.D. za nalepení a zapojení tenzometrů na prototyp snímače, bez kterého by se neobešlo experimentální měření. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat celé své rodině za bezmeznou podporu během celého studia, zvláště pak mému otci za velmi cenné rady při výrobě prototypu snímače.



# OBSAH

|   |    |
|---|----|
| 1. Úvod .....   | 14 |
| 2. Teoretická část .....                                      | 15 |
| 2.1. Měření přetvoření pomocí odporové tenzometrie .....      | 15 |
| 3. Praktická část .....                                       | 18 |
| 3.1. Funkce snímače a jeho parametry .....                    | 18 |
| 3.2. Návrh tvaru snímače a volba materiálu .....              | 19 |
| 3.3. Výpočet rozměrů deformačního segmentu .....              | 21 |
| 3.4. Návrh tenzometrického zapojení .....                     | 26 |
| 3.5. Postup vyjádření sil $F_x$ , $F_y$ a $F_z$ .....         | 28 |
| 3.6. Analytické vyjádření sil $F_x$ , $F_y$ a $F_z$ .....     | 29 |
| 3.6.1 Analytické vyjádření přetvoření na segmentu 1 .....     | 32 |
| 3.6.2 Analytické vyjádření přetvoření na segmentu 2 a 3 ..... | 36 |
| 3.6.3 Analytické vyjádření sil .....                          | 37 |
| 3.7. Numerické vyjádření sil $F_x$ , $F_y$ a $F_z$ .....      | 39 |
| 3.8. Porovnání analytického a numerického vyjádření sil ..... | 42 |
| 4. Experimentální část .....                                  | 43 |
| 4.1. Popis experimentu .....                                  | 43 |
| 4.2. Výsledky experimentu .....                               | 46 |
| 4.3. Porovnání experimentu s výpočty .....                    | 49 |
| 5. Závěr .....  | 50 |
| 6. Seznam použité literatury .....                            | 51 |
| 7. Seznam příloh .....  | 52 |

# 1. Úvod

I v dnešní době velice vyspělých numerických simulačních softwarů je u konstrukce spousty strojních součástí stále nutný experiment. S měřením silového působení se každý setkává téměř denně, ať už jde třeba jen o kuchyňskou váhu. V takové jednoduché aplikaci se často spokojíme jen s jednoosým měřením, ovšem s dnešním obrovsky rychle se rozvíjícím průmyslem a zvyšující se složitostí strojních součástí a konstrukcí je někdy nezbytné i měření ve třech osách. Někdy ani nemůžeme předpovědět, jaké silové působení bude na součást působit a zde přichází na řadu tříosé snímače sil.

Snímač by mohl najít velké uplatnění jak ve statických zkouškách v měření neznámých sil, tak i v dlouhodobých měřeních týkajících se například vyhodnocování únavových cyklů, kde nelze předem určit o jaký cyklus se jedná. Další uplatnění by mohlo být v medicíně například při testování kloubních náhrad, kde by mohlo být změřeno silové působení na kloub v celém průběhu kroku, či nějakého jiného pohybu.

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout a otestovat snímač sil, který by byl schopný změřit sílu až 100N v každé ose a rozložit ji do tří os ortogonální souřadnicové soustavy  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

## 2. Teoretická část

### 2.1. Měření přetvoření pomocí odporové tenzometrie

Kapitola byla zpracována podle [3], [4], [5].

Měření sil pomocí odporové tenzometrie je nejpoužívanější způsob měření přetvoření na strojních součástech. Měření přetvoření se používá především k následnému přepočítávání na mechanické napětí pomocí Hookova zákona. Z napětí lze pak v případě potřeby vyjádřit sílu, která toto napětí vyvolává.

Fyzikální podstatou odporové tenzometrie je závislost odporu elektrického vodiče na jeho prodloužení. Změna odporu je dána rovnicí 2.1.

$$R = \frac{\rho L}{S} \quad (2.1)$$

, kde  $R$  – změna odporu vodiče  $[\Omega]$   
 $\rho$  – specifický odpor  $[\Omega \cdot m]$   
 $L$  – délka vodiče  $[m]$   
 $S$  – příčný průřez vodiče  $[m^2]$

Pro konečnou změnu odporu  $\Delta R$  lze odvodit vztah 2.2.

$$\frac{\Delta R}{R} = k\varepsilon \quad (2.2)$$

, kde  $k$  – deformační součinitel tenzometru (k-faktor)  $[-]$   
 $\varepsilon$  – délkové přetvoření  $[-]$

Tento k-faktor je bezrozměrný součinitel, který v sobě zahrnuje vliv měřicí mřížky, teploty, ale i celé konfigurace tenzometru. Výrobce jej uvádí u každého tenzometru.

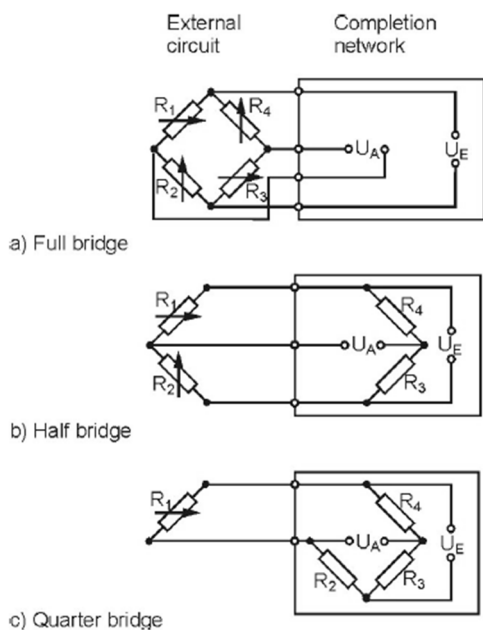
Pokud je třeba tenzometr provozovat za jiné než pokojové teploty, výrobce udává vztahy, dle kterých je možné vypočítat k-faktor, který bude kompenzovat samovolné natahování, či zkracování mřížky vlivem teploty. Nicméně po instalaci tenzometru je již nutné teplotu udržovat, protože s kolísající teplotou by kolísalo i přetvoření vlivem teplotní roztažnosti vodiče. V případě, že by nebylo možné udržovat stejnou teplotu během měření, existují i samokonpenzovatelné tenzometry, kterými lze docílit minimalizace zdánlivé deformace v jistém teplotním intervalu. Tato vlastnost lze docílit změnou elektrického odporu vodiče tenzometru. Této vlastnosti lze docílit jak úpravou chemického složení materiálu, tak i vhodným tepelným a mechanickým zpracováním vodiče tenzometru.

Pomocí tenzometrů lze provádět i dynamické měření, je ovšem nutné brát ohled na únavové vlastnosti tenzometru a horní měřicí frekvenci.

Speciální pozornost je nutné věnovat napájecímu napětí. Například pokud tenzometrem o odporu  $120\ \Omega$  protéká napětí  $5\text{V}$ , ze vztahu 2.3 lze zjistit, je proudové zatížení tenzometru je  $42\text{mA}$ . Jelikož má vodič tenzometru opravdu malou plochu příčného průřezu, i takový malý proud může způsobit výrazné oteplení tenzometru, které způsobuje nepřesnosti v měření.

$$I = \frac{U}{R} \quad (2.3)$$

Měření přetvoření pomocí tenzometrů se nejčastěji realizuje pomocí zapojení tenzometrů do takzvaného Wheatstonova můstku, který vynalezl Sir Charles Wheatstone v roce 1943. Tento elektrický obvod je vhodný pro měření malé změny elektrického odporu.



Obr. 2.1 - Zapojení do Wheatstonova můstku[4]

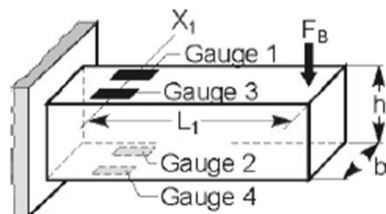
Na obrázku 2.1 jsou zobrazeny 3 různé zapojení do Wheatstonova můstku. V případě a) je to zapojení do plného můstku, v případě b) do polovičního můstku a v případě c) do čtvrt'ového můstku. Napětí  $U_A$  je známé vstupní napětí a napětí  $U_E$  je neznámé měřené napětí. Při zapojení do plného mostu platí rovnice 2.4.

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (2.4)$$

Označení jako poloviční, či čtvrt'ový můstek však nejsou zcela přesná, protože zapojení je vždy plné, záleží ale na tom, jestli je celkově, nebo jen částečně tvořeno tenzometry.



Na obrázku 2.2 je zakresleno umístění tenzometrů při měření síly na ohýbaném nosníku. Jedná se o zapojení do plného mostu. Všechny tenzometry ukazují stejnou hodnotu přetvoření, rozdíly jsou jen ve znaménkách. Pod tenzometry 1 a 3 je kladné přetvoření, kdežto pod tenzometry 2 a 4 je přetvoření záporné.



Obr. 2.2 - Měření síly na ohýbaném nosníku [4]

Při dosazení do rovnice 2.4 dostáváme rovnici 2.5.

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4} (\varepsilon_1 - (-\varepsilon_2) + \varepsilon_3 - (-\varepsilon_4)) \quad (2.5)$$

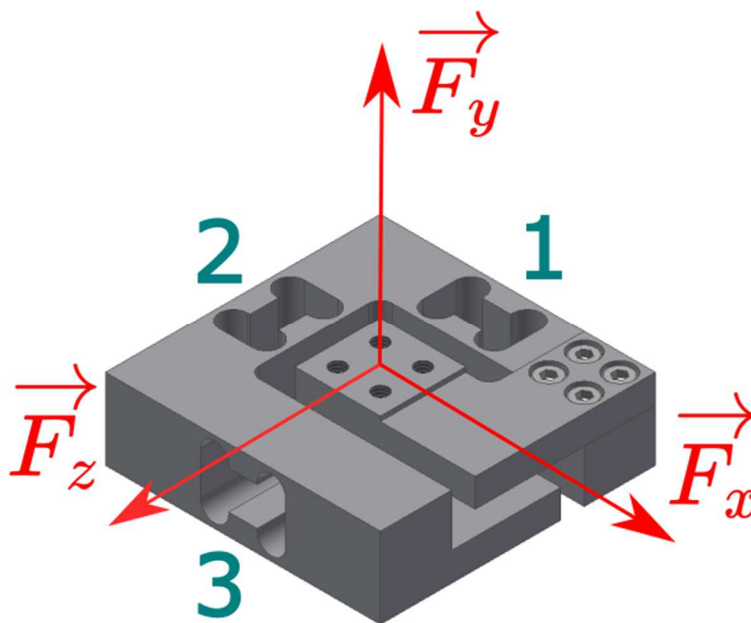
Při uvažování  $|\varepsilon_1| = |\varepsilon_2| = |\varepsilon_3| = |\varepsilon_4|$  můžeme rovnici 2.5 upravit na finální vztah pro výpočet přetvoření 2.6.

$$|\varepsilon| = \frac{U_A}{U_E k} \quad (2.6)$$

## 3. Praktická část

### 3.1. Funkce snímače a jeho parametry

Funkcí snímače bylo rozložit neznámou působící sílu na snímač do tří na sebe kolmých os X, Y a Z viz obrázek 3.1. K tomu sloužily sady lineárních odporových tenzometrů přilepených v nejužších místech na deformačních segmentech 1, 2 a 3.



Obr. 3.1 - Osy a deformační segmenty snímače

Cílem práce bylo vytvořit snímač schopný měřit silové zatížení až do 100N v každé ose, což odpovídá celkové síle 173,2N. Co se týká chyby měření, byl stanoven cíl nepřekročit chybu měření 1%, což odpovídá 1N v každé ose. Tato tolerance se týkala pouze výrobních tolerancí, celková chyba měření byla předpokládána mnohem větší, vlivem nepřesného nalepení tenzometrů, chyby měření elektrických veličin a podobně. Všechny tyto nepřesnosti byly eliminovány při optimalizaci k-faktoru při experimentálním měření.

### 3.2. Návrh tvaru snímače a volba materiálu

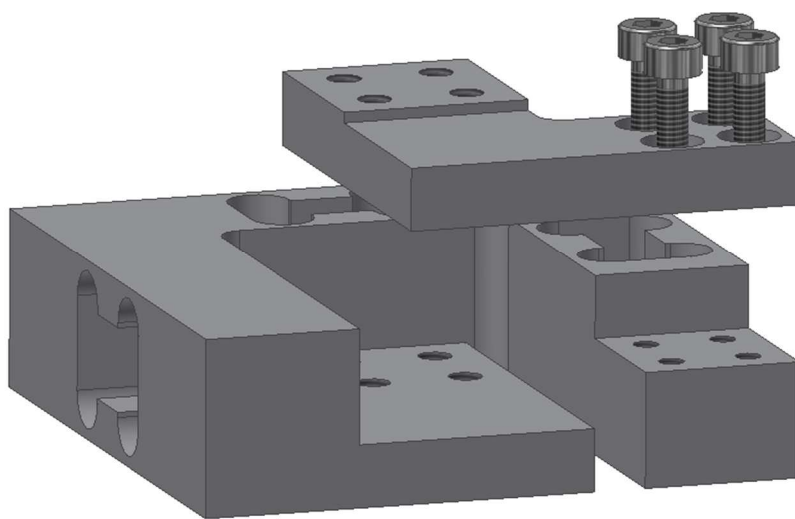
Tvar bylo nutné navrhnout tak, aby se upínací plochy mohly volně deformovat ve všech třech osách. Dosedací plochy byly opatřeny čtyřmi závity, které sloužily k uchycení snímače k základně a k místu, kde má být síla měřená. Snímač obsahoval 3 deformační segmenty, které měly příčný průřez zeslabený tak, aby se mohl snadno deformovat, ale aby vydržel předepsané zatížení. S následující koncepcí byly uvažovány 2 různé konstrukce.

- 1) Snímač pro malé síly, který by byl vyfrézován z jednoho kusu
- 2) Snímač pro větší síly, který by byl vyroben ze 2 kusů, a poté by byl složen do jednoho celku

Výroba snímače z jednoho kusu je složitější. Důvod, proč by bylo velmi náročné velký snímač vyrobít z jednoho kusu je ten, že čím je snímač větší, tím hlubší drážka (ve směru osy X) se musí frézovat, což je problematické kvůli délce frézy. Například firma K-TOOLS vyrábí frézy průměru 4 mm v maximální délce 34 mm[9]. Z tohoto důvodu bylo rozhodnuto, že se bakalářská práce bude zabývat konstrukcí snímače ze dvou kusů.

Základní princip, na kterém snímač funguje je ten, že kromě deformačních segmentů se snímač nedeformuje. Jinými slovy, až na deformační segmenty se snímač chová jako dokonale tuhé těleso, z čehož plyne, že jediné rozměry, které jsou z hlediska funkce podstatné, jsou rozměry deformačního segmentu. Ostatní rozměry byly voleny z hlediska technologie výroby a tak, aby byl snímač co nejmenší.

Na obrázku 3.2 je snímač vyobrazen předběžný návrh tvaru snímače. Rozměry nebyly počítány, snahou bylo pouze vytvořit snímač co nejmenší. Optimalizace rozměrů, respektive rozměrů deformačních segmentů proběhla v dalších kapitolách.



Obr. 3.2 - Předběžný tvar snímače

V tabulce 1 jsou vypsány vlastnosti čtyř materiálů, které jsou vhodné ke konstrukci snímače. Hliníková slitina EN AW6063 T66, 2 ocelové konstrukční oceli S235J2G2 a S355J2G3 a nerezová ocel ČSN 17 420. Hliníková slitina má výhodu dobré obrobitelnosti, zhruba 3x menší hmotnosti a vhodnosti použití v i korozním prostředí. Její nevýhoda je vyšší cena. Konstrukční oceli mají výhodu vyšší meze kluzu a menší ceny, ovšem budou hůře obrobitelné a nemohou být použity v korozním prostředí. Nerezová ocel má výhodu použití v korozním prostředí, ovšem oproti hliníkové slitině má horší obrobitelnost, větší váhu, vyšší cenu a srovnatelné mechanické vlastnosti.

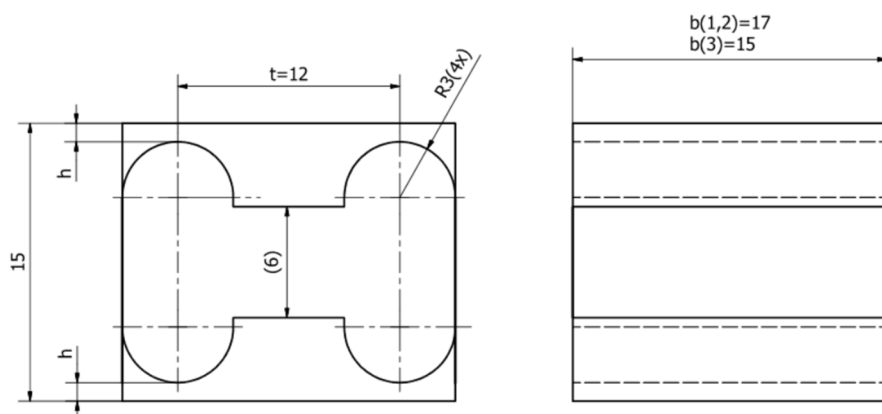
*Tab. 1 - Tabulka materiálů [10], [11], [12], [13]*

| Materiál      | Mez kluzu | Mez pevnosti | Poissonův poměr | Cena      |
|---------------|-----------|--------------|-----------------|-----------|
| EN AW6063 T66 | 200 MPa   | 245 MPa      | 0,33            | 120 Kč/kg |
| S235J2G2      | 215 MPa   | 360-510 MPa  | 0,29            | 24 Kč/kg  |
| S355J2G3      | 355 MPa   | 470-530 MPa  | 0,29            | 26 Kč/kg  |
| ČSN 17 420    | 230 MPa   | 500 MPa      | 0,29            | 160 Kč/kg |

Nejvhodnější materiál pro výrobu snímače je hliníková slitina.

### 3.3. Výpočet rozměrů deformačního segmentu

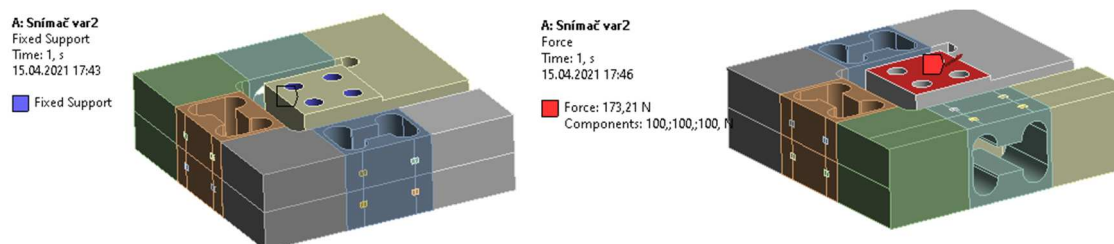
Cílem této kapitoly byl výpočet důležitých rozměrů včetně výrobních tolerancí tak, aby byla dosažena cílená přesnost snímače. Výška příčného průřezu  $h$ , šířka příčného průřezu  $b$ , a také rozteč mezi drážkami  $t$ , jsou jediné rozměry snímače, které je potřeba optimalizovat. Výška a šířka příčného průřezu ovlivňují napětí tím, že zmenšují příčný průřez, kdežto rozměr  $t$  ovlivňuje velikost ohybového momentu v deformačním segmentu. Jak již bylo řečeno, snímač se může deformovat jen ve zúženém místě deformačního segmentu, je tedy nutné jeho rozměry navrhnout tak, aby se tam snímač opravdu snadno deformoval, ale aby zde zároveň nedošlo poškození snímače. Šířka příčného průřezu a rozteč drážek byla zvolena a těmto rozměrům bude přizpůsobena výška příčného průřezu. Rozměry deformačních segmentů jsou zobrazeny na obrázku 3.3.



Obr. 3.3 - Rozměry deformačního segmentu

Jak je vidět z obrázku 3.3, deformační segmenty 1 a 2 mají jinou šířku příčného průřezu než segment 3. Není to velký problém, znamená to jen, že výška příčného průřezu segmentu 3 bude větší než u segmentů 1 a 2.

Celá deformačně-napěťová analýza i optimalizace rozměrů probíhala v prostředí programu ANSYS. Nastavení okrajových podmínek je zobrazeno na obrázku 3.4. Na spodní otvory bylo aplikováno vetknutí, což zamezilo všechny posuvy a natočení. Na horní plochu byla aplikována síla. Sít' deformačních segmentů byla tvořena téměř výhradně z kvadratických šestihranů o velikosti hrany 1 mm.

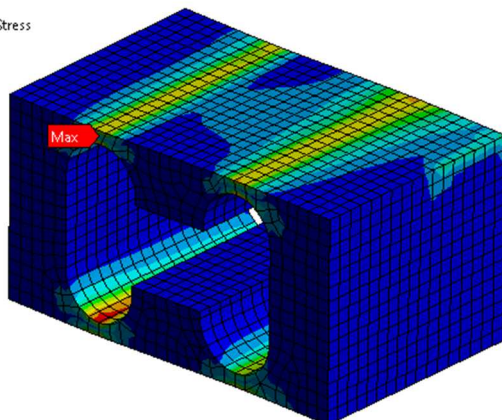


Obr. 3.4 - Okrajové podmínky numerického modelu

Na obrázku 3.5 je vykresleno redukované napětí na deformačních segmentech při maximálním zatížení snímače, tedy 100N v každé ose. Z výsledků bylo patrné kde se nacházela kritická místa a bylo zde možné síť konečných prvků více zjemnit a zpřesnit tak výsledky.

A: Snímač var2  
Sigma\_red\_def1  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: MPa  
Time: 1  
06.03.2021 14:08

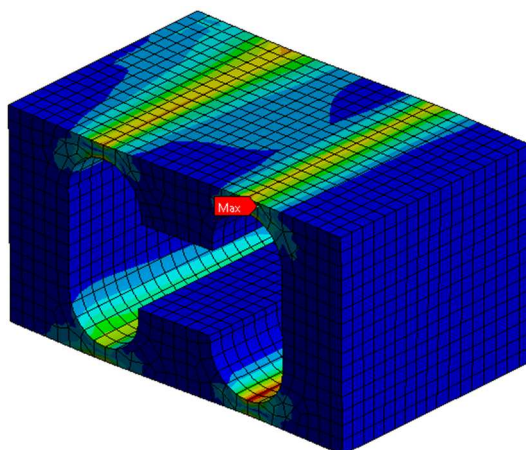
134,79 Max  
119,82  
104,86  
89,889  
74,921  
59,954  
44,987  
30,019  
15,052  
0,084718 Min



Segment 1

A: Snímač var2  
Sigma\_red\_def2  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: MPa  
Time: 1  
06.03.2021 14:10

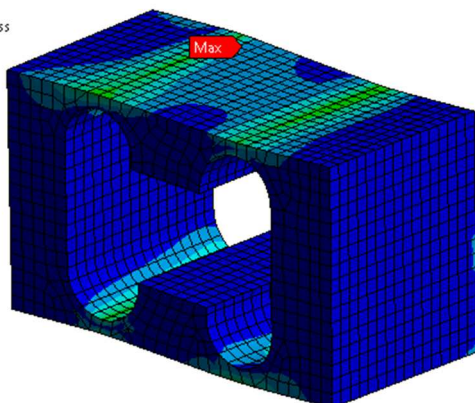
134,61 Max  
119,66  
104,72  
89,767  
74,818  
59,869  
44,92  
29,971  
15,022  
0,072568 Min



Segment 2

A: Snímač var2  
Sigma\_red\_def3  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: MPa  
Time: 1  
06.03.2021 14:10

249,82 Max  
222,07  
194,32  
166,57  
138,83  
111,08  
83,329  
55,58  
27,831  
0,082408 Min



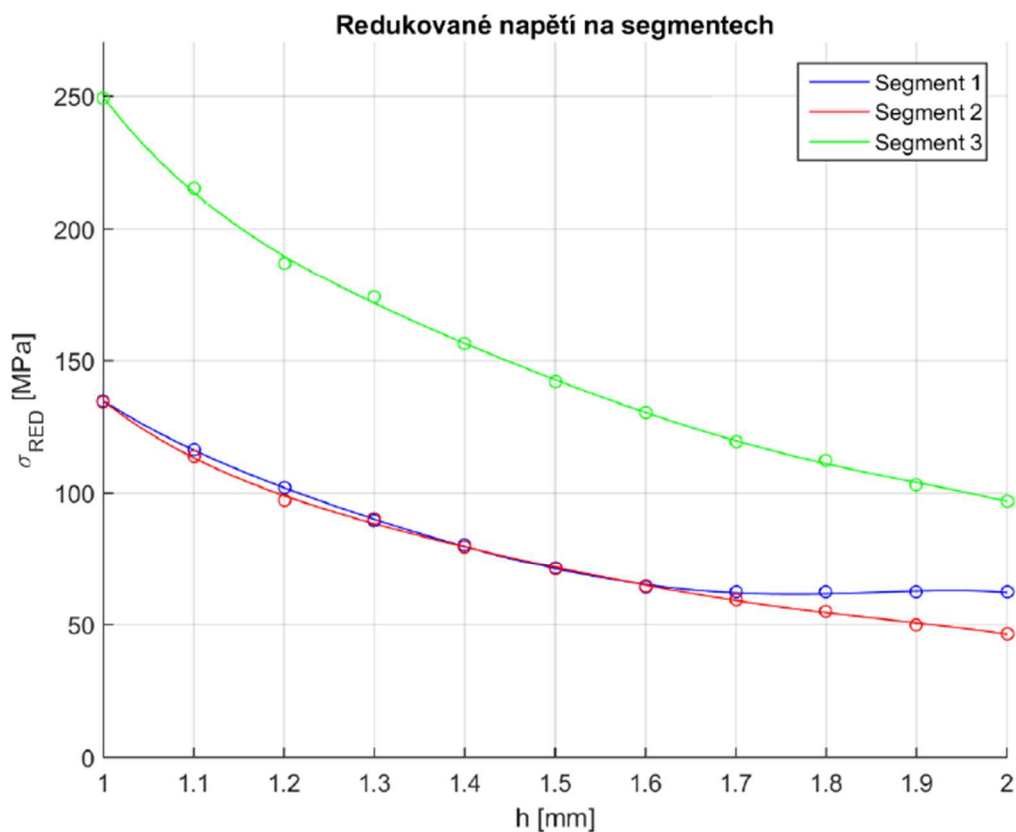
Segment 3

Obr. 3.5 - Redukované napětí v segmentech

Tab. 2 - Výsledky redukovaného napětí v segmentech

| h<br>[mm] | $\sigma_{RED}^{Segment\ 1}$<br>[MPa] | $\sigma_{RED}^{Segment\ 2}$<br>[MPa] | $\sigma_{RED}^{Segment\ 3}$<br>[MPa] |
|-----------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 1         | 134,8                                | 134,6                                | 249,2                                |
| 1,1       | 116,4                                | 113,9                                | 215,2                                |
| 1,2       | 101,9                                | 97,3                                 | 187                                  |
| 1,3       | 89,7                                 | 90,2                                 | 174,1                                |
| 1,4       | 80,3                                 | 79,6                                 | 156,4                                |
| 1,5       | 71,6                                 | 71                                   | 142,3                                |
| 1,6       | 64,2                                 | 64,7                                 | 130,4                                |
| 1,7       | 62,2                                 | 59,5                                 | 119,3                                |
| 1,8       | 62,2                                 | 55                                   | 112,4                                |
| 1,9       | 62,2                                 | 50                                   | 103,1                                |
| 2         | 62,2                                 | 46,5                                 | 97                                   |

V tabulce 2 jsou zapsány výsledky redukovaného napětí v závislosti na výšce příčného průřezu. U segmentu 1 se od výšky příčného průřezu 1,7 mm dále neměnilo redukované napětí, ovšem nebylo to tím, že by se se zvětšující výškou již nesnižovalo napětí v nejužším místě, jen už bylo kritické místo někde jinde. Na obrázku 3.6 je vidět grafická závislost. Naměřené body byly aproximovány polynomem pátého stupně.



Obr. 3.6 - Redukované napětí na segmentech

Ke stanovení výšky příčného průřezu bylo nutné vědět, jaké redukované napětí by mělo v kritickém místě vycházet. To lze zjistit ze vztahu 3.1. Bezpečnost k meznímu stavu pružnosti byla zvolena 2, což znamená, že by bylo možné snímač přetížít od dalších 100N v každé ose bez jakéhokoliv poškození.

$$k_k = \frac{R_e}{\sigma_{RED}}$$

$$\sigma_{RED} = \frac{R_e}{k_k} \quad (3.1)$$

, kde  $\sigma_{RED}$  – redukované napětí [MPa]  
 $R_e$  – mez kluzu materiálu [MPa]  
 $k_k$  – bezpečnost k meznímu stavu pružnosti [-]

$$\sigma_{RED} = \frac{R_e^{EN AW6063 T66}}{k_k} = \frac{200}{2} = 100 \text{ MPa}$$

U příčných průřezů 1 a 2 tomuto napětí odpovídá výška příčného průřezu  $h_{1,2} = 1,2 \text{ mm}$ . U příčného průřezu 3 je to hodnota  $h_3 = 1,95 \text{ mm}$ . Taková hodnota je pro výrobu a měření zbytečně složitá a byla zaokrouhlena na  $h_3 = 2 \text{ mm}$ .

Dále bylo potřeba zjistit výrobní tolerance důležitých rozměrů deformačních segmentů. Opět zde bylo potřeba optimalizovat jen 3 rozměry. Výšku, šířku příčného průřezu a rozteč drážek. Dvě tolerance byly opět zvoleny a třetí k nim byla zjištěna. Šířka příčného průřezu byla zvolena  $b_{1,2} = 17 \pm 0,1$  a  $b_3 = 15 \pm 0,1$ . Rozteč drážek byla zvolena  $t = 12 \pm 0,1$ .

Jako první krok bylo třeba zjistit závislost normálového napětí na působící síle, protože z normálového napětí se přepočítává přetvoření, ze kterého se přepočítává síla, což je požadovaný výstup snímače. Měření bylo provedeno pro nejhorší možný případ, kdy šířky příčných průřezů byly vyrobeny  $b_{1,2} = 16,9$  a  $b_3 = 16,9$  a rozteč drážek  $t = 12,1$ . Měření bylo provedeno v prostředí ANSYS a výsledky zapsány do tabulky 3.

Tab. 3 - Závislost působící síly na normálovém napětí

| $F_x$<br>[N] | $\sigma_z^{Segment 2}$<br>[MPa] | $F_y$<br>[N] | $\sigma_x^{Segment 3}$<br>[MPa] | $F_z$<br>[N] | $\sigma_x^{Segment 1}$<br>[MPa] |
|--------------|---------------------------------|--------------|---------------------------------|--------------|---------------------------------|
| 0            | 0                               | 0            | 0                               | 0            | 0                               |
| 20           | 14,958                          | 20           | 5,989                           | 20           | 14,821                          |
| 40           | 29,916                          | 40           | 11,841                          | 40           | 29,641                          |
| 60           | 44,874                          | 60           | 17,761                          | 60           | 44,462                          |
| 80           | 59,832                          | 80           | 23,682                          | 80           | 59,283                          |
| 100          | 74,790                          | 100          | 29,602                          | 100          | 74,104                          |

Z tabulky 3 je patrné, že se jedná o lineární závislost, což vychází už z předpokladu lineárně pružného materiálu z Hookova zákona. Z naměřených hodnot už bylo jen potřeba vyjádřit jakému normálovému napětí odpovídá síla 1N.



Segment 1 a 2: 1 N  $\approx$  0,748 MPa  
 Segment 3: 1 N  $\approx$  0,3 MPa

Tab. 4 - Změna normálového napětí v závislosti na změně výšky příčného průřezu

| $h_{1,2}$<br>[mm] | $\sigma_x^{Segment\ 1}$<br>[MPa] | $h_3$<br>[mm] | $\sigma_x^{Segment\ 3}$<br>[MPa] |
|-------------------|----------------------------------|---------------|----------------------------------|
| 1,10              | 35,135                           | 1,90          | 13,239                           |
| 1,12              | 34,058                           | 1,92          | 13,047                           |
| 1,14              | 32,860                           | 1,94          | 12,639                           |
| 1,16              | 31,803                           | 1,96          | 12,314                           |
| 1,18              | 30,449                           | 1,98          | 12,068                           |
| 1,2               | 29,641                           | 2             | 11,841                           |
| 1,22              | 28,713                           | 2,02          | 11,607                           |
| 1,24              | 27,624                           | 2,04          | 11,436                           |
| 1,26              | 26,144                           | 2,06          | 11,112                           |
| 1,28              | 25,341                           | 2,08          | 10,969                           |
| 1,30              | 24,575                           | 2,10          | 10,733                           |

V tabulce 4 je uvedena změna normálového napětí na změně výšky příčného průřezu. Při dodržení původně zvolené odchylky měření  $\pm 1$ N, vyšla tolerance výšky příčného průřezu  $\pm 0,02$  mm.

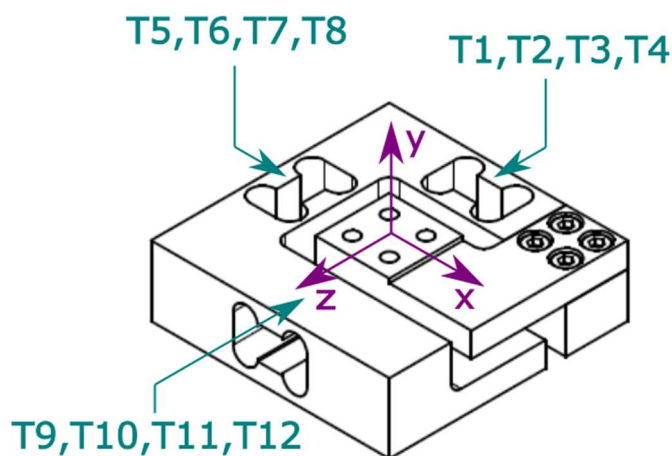
V tabulce 5 jsou uvedeny odchylky měření při jiných tolerancích výšky příčného průřezu.

Tab. 5 - Závislost přesnosti snímače na toleranci výšky příčného průřezu

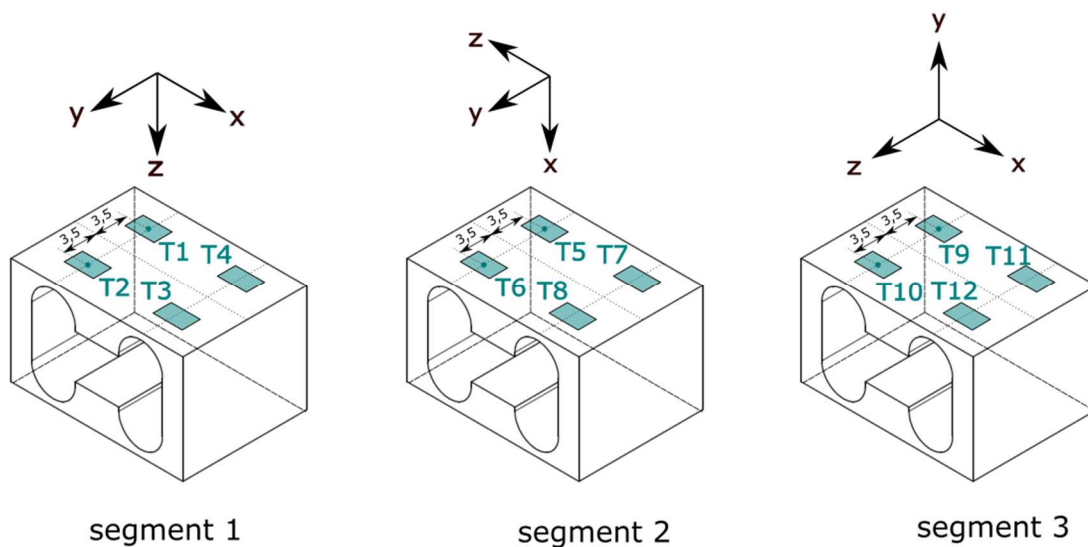
| Segment 1 a 2         |                         | Segment 3             |                         |
|-----------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------|
| Mezní úchylky<br>[mm] | Přesnost snímače<br>[N] | Mezní úchylky<br>[mm] | Přesnost snímače<br>[N] |
| 1,2 $\pm$ 0,02        | $\pm 1,1$               | 2 $\pm$ 0,02          | $\pm 0,75$              |
| 1,2 $\pm$ 0,04        | $\pm 2,9$               | 2 $\pm$ 0,04          | $\pm 1,6$               |
| 1,2 $\pm$ 0,06        | $\pm 4,25$              | 2 $\pm$ 0,06          | $\pm 2,65$              |
| 1,2 $\pm$ 0,08        | $\pm 5,9$               | 2 $\pm$ 0,08          | $\pm 4$                 |
| 1,2 $\pm$ 0,1         | $\pm 7,35$              | 2 $\pm$ 0,1           | $\pm 4,65$              |

### 3.4. Návrh tenzometrického zapojení

Bylo rozhodnuto, že se bude jednat o zapojení tenzometrů do plného Wheatstonova můstku, což je nejpoužívanější způsob zapojení tenzometrů při měření ohýbaného tělesa. Na každém deformačním segmentu byly instalovány 4 lineární tenzometry. Značení tenzometrů je zobrazeno na obrázku 3.7 a umístění na obrázku 3.8.



Obr. 3.7 - Označení tenzometrů na snímači

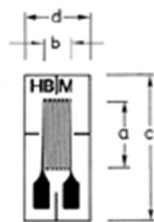


Obr. 3.8 - Umístění tenzometrů

Byly použity tenzometry LY41-1,5/120 od firmy HBM, což je nejběžnější typ s ideálními rozměry. Tyto tenzometry mají rozměry a vlastnosti dle tabulky 6 a obrázku 3.9[8].

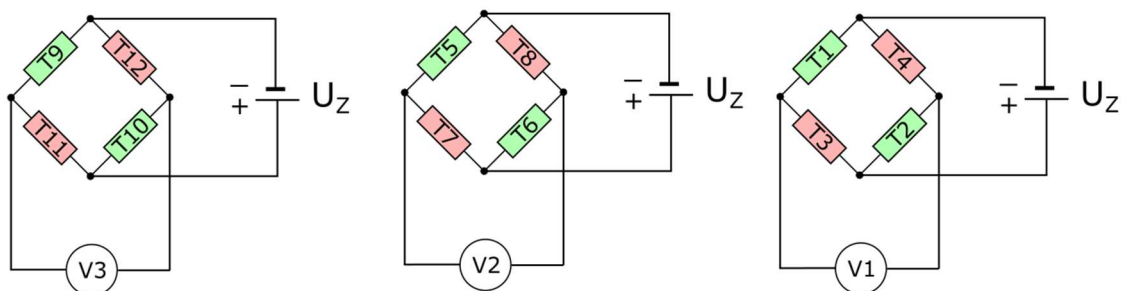
Tab. 6 - Vlastnosti a rozměry tenzometru[8]

| LY41-1,5/120 | Nominální odpor<br>[Ω] | Rozměry   |           |           |           | Maximální budící<br>napětí<br>[V] |
|--------------|------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------------------------------|
|              |                        | a<br>[mm] | b<br>[mm] | c<br>[mm] | d<br>[mm] |                                   |
|              | 120                    | 1,5       | 1,2       | 7         | 5         | 2,5                               |



Obr. 3.9 - Rozměry tenzometru[8]

Na obrázku 3.10 je znázorněno zapojení tenzometrů. Zelená a červená barva značí jaké tenzometry jsou v dané chvíli natahovány či stlačovány.



Obr. 3.10 - Schéma tenzometrického zapojení

Z napětí naměřených na voltmetrech V1-V3 se počítá přetvoření na segmentech, viz vzorce 3.2 – 3.4.

$$\varepsilon_1 = \frac{U_1}{U_z \cdot k_1} \quad (3.2)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{U_2}{U_z \cdot k_2} \quad (3.3)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{U_3}{U_z \cdot k_3} \quad (3.4)$$

### 3.5. Postup vyjádření sil $F_x$ , $F_y$ a $F_z$

Z tenzometrů dostaneme informaci o přetvoření v místě, kde jsou nalepeny. Podle orientace mřížky v tenzometru dostaneme vždy odpovídající přetvoření ve směru, ve kterém mřížka směřuje. Na každém deformačním segmentu byla instalována jedna sada mřížek, která měřila přetvoření v jednom směru. Jelikož měl senzor 3 deformační segmenty ve 3 směrech, výstupy byly 3 přetvoření ve třech směrech, konkrétně  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  a  $\varepsilon_3$ . Ze zobecněného Hookova zákona lze přetvoření vyjádřit dle vztahů 3.5-3.7.

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_x}{E} - \mu \cdot \frac{\sigma_y}{E} - \mu \cdot \frac{\sigma_z}{E} \quad (3.5)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma_z}{E} - \mu \cdot \frac{\sigma_x}{E} - \mu \cdot \frac{\sigma_y}{E} \quad (3.6)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{\sigma_x}{E} - \mu \cdot \frac{\sigma_y}{E} - \mu \cdot \frac{\sigma_z}{E} \quad (3.7)$$

, kde:  $\sigma$  – normálové napětí [MPa]  
 $\varepsilon$  – poměrné prodloužení [-]  
 $E$  – modul pružnosti v tahu [MPa]  
 $\mu$  – Poissonův poměr [-]

Indexy 1, 2, 3 u přetvoření byly voleny číselně, jelikož jak tenzometr na segmentu 1 tak tenzometr na segmentu 3 měří přetvoření v ose x. Pokud by tedy měly být indexy voleny podle směru ve kterých je přetvoření měřeno, vznikl by zmatek ve značení. Přetvoření  $\varepsilon_1$  tedy značí přetvoření naměřené na deformačním segmentu 1. Tohle značení tedy nemá nic společného s hlavními rovinami, pro které jsou tyto indexy vyčleněny.

Normálové napětí je funkcí sil  $F_x$ ,  $F_y$  a  $F_z$ . V dalších kapitolách budou vyjádřeny 3 vztahy, jeden pro každý deformační segment viz vzorce 3.8 – 3.10.

$$\varepsilon_1 = f(F_x, F_y, F_z) \quad (3.8)$$

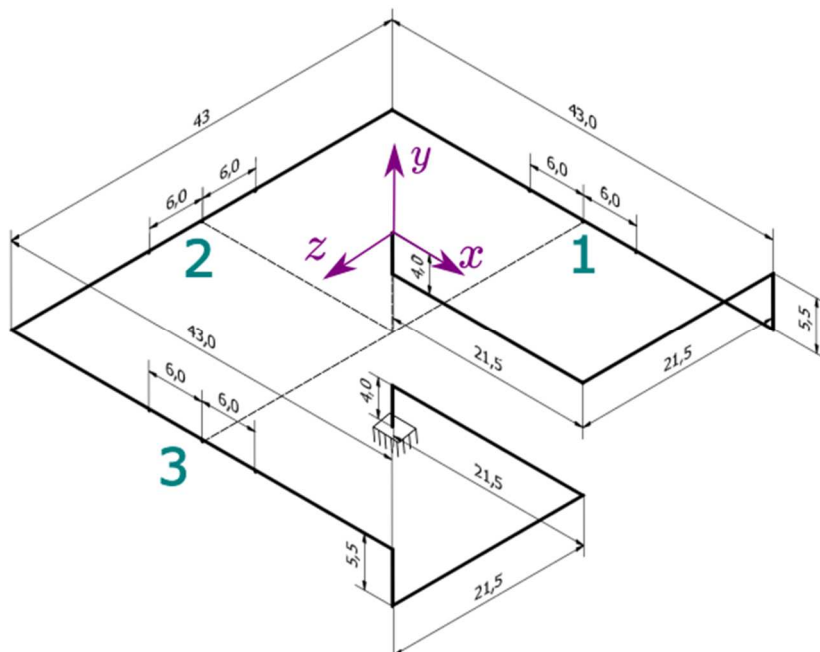
$$\varepsilon_2 = f(F_x, F_y, F_z) \quad (3.9)$$

$$\varepsilon_3 = f(F_x, F_y, F_z) \quad (3.10)$$

Jediné neznámé jsou zde budou  $F_x$ ,  $F_y$  a  $F_z$ . Bude se tedy jednat o soustavu 3 rovnic o 3 neznámých. Z těch je jen potřeba vyjádřit všechny síly, což je výstup snímače.

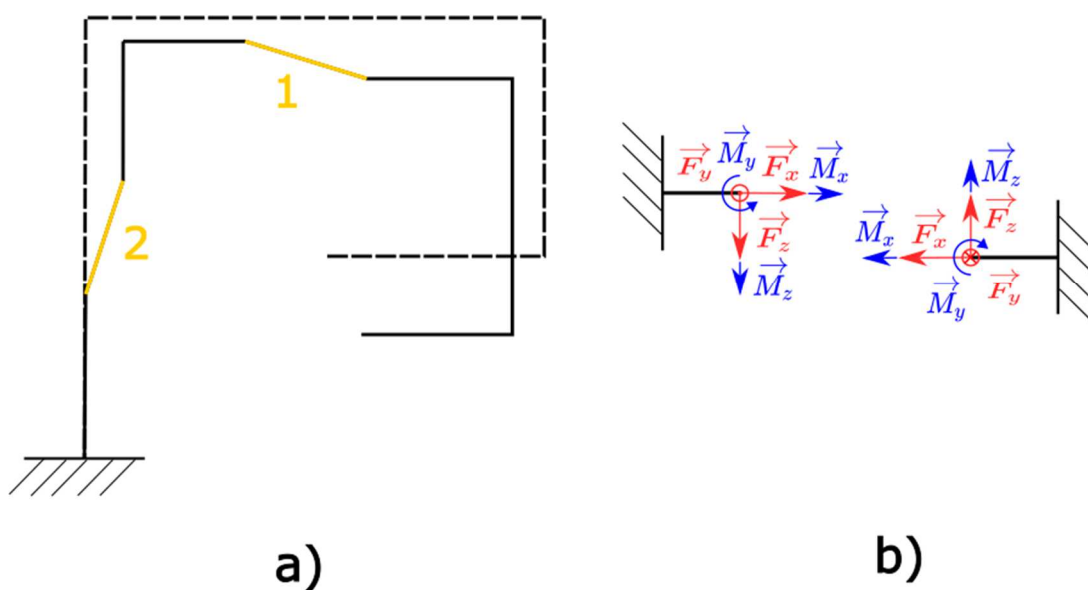
### 3.6. Analytické vyjádření sil $F_x$ , $F_y$ a $F_z$

Pro analytický výpočet byl snímač uvažován jako zalomený prut viz obrázek 3.11.

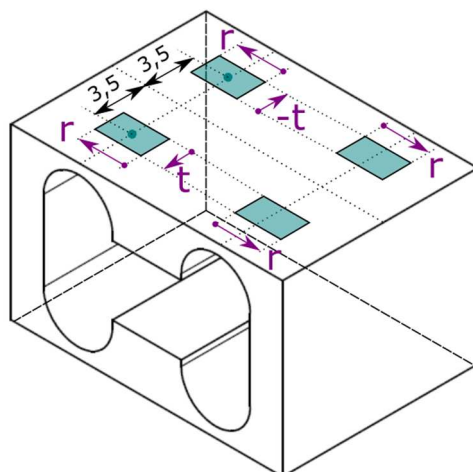


Obr. 3.11 - Snímač jako zalomený prut

Z celého prutu byly analyzovány pouze deformační segmenty. Silová soustava v počátku snímače byla vždy přenesena do středu segmentu, čímž vznikla nová silová soustava, ve které vznikl nový moment v každé ose, aby byla nová silová soustava ekvivalentní se starou. Vzhledem k deformaci, zobrazené na obrázku 3.12 a) byl každý segment uvolněn dle obrázku 3.12 b).

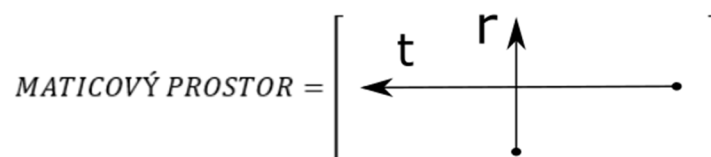


Obr. 3.12 - Deformace prvních dvou segmentů



Obr. 3.13 - Znáznornění deformačního segmentu

Na obrázku 3.13 jsou znázorněny tenzometry a použitý souřadnicový systém. Při použití tenzometrů LY41-1,5/120 měla souřadnice  $r$  hodnoty (5,65 ; 6,75) a souřadnice  $t$  (2,9 ; 4,1). Tyto dvě osy definují maticový prostor, kde řádky reprezentují osu  $t$  a sloupce osu  $r$ , viz obrázek 3.14.



Obr. 3.14 - Maticový prostor

Bylo zvoleno, že se bude jednat o maticový prostor 16x16, což znamená, že každá strana tenzometru se rozdělila na 16 dílů. Díl osy  $r$  měl tedy délku 0,1 mm a díl osy  $t$  0,08 mm. Takové dělení se zdálo dostatečně jemné. Maticový prostor tedy definují matice  $\mathbf{R}$  a  $\mathbf{T}$  viz vztahy 3.11 a 3.12.

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 4,10 & 4,02 & 3,94 & 3,86 & \cdots & 2,90 \\ 4,10 & 4,02 & 3,94 & 3,86 & \cdots & 2,90 \\ 4,10 & 4,02 & 3,94 & 3,86 & \cdots & 2,90 \\ 4,10 & 4,02 & 3,94 & 3,86 & \cdots & 2,90 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 4,10 & 4,02 & 3,94 & 3,86 & \cdots & 2,90 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 6,75 & 6,75 & 6,75 & 6,75 & \cdots & 6,75 \\ 6,65 & 6,65 & 6,65 & 6,65 & \cdots & 6,65 \\ 6,55 & 6,55 & 6,55 & 6,55 & \cdots & 6,55 \\ 6,45 & 6,45 & 6,45 & 6,45 & \cdots & 6,45 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 5,25 & 5,25 & 5,25 & 5,25 & \cdots & 5,25 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

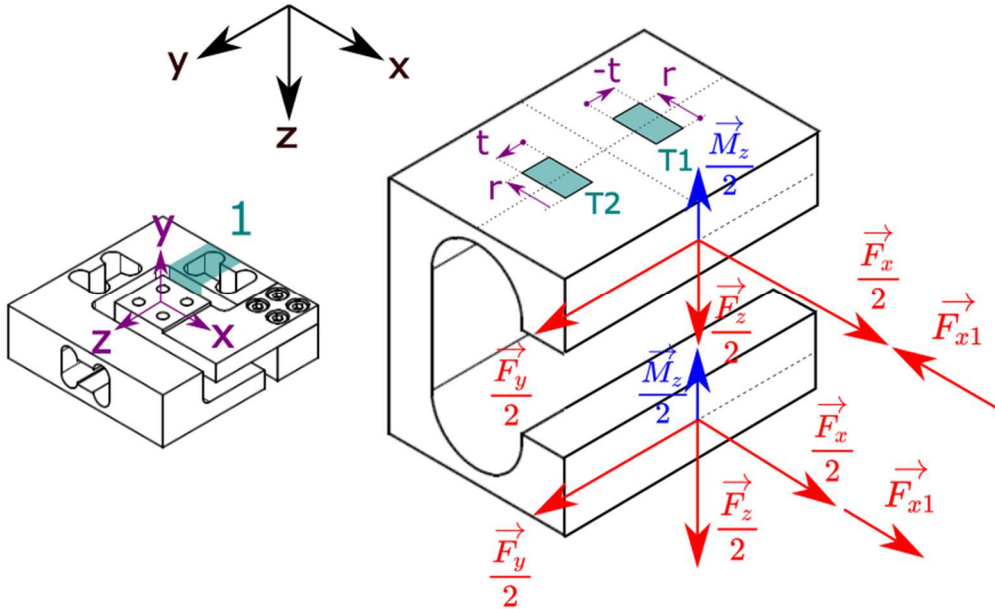
Do maticového prostoru musely být ovšem přepsány všechny rozměry, které se mění v rámci rozměru tenzometru. Což znamená, že musela být vytvořena i matice **H12**, která definuje výšku příčného průřezu segmentu 1 a 2 a také matice **H3**, která definuje výšku příčného průřezu 3. Rozměry byly změřeny v grafickém softwaru Autocad Inventor.

$$\mathbf{H12} = \begin{bmatrix} 1,295 & 1,295 & 1,295 & 1,295 & \dots & 1,295 \\ 1,271 & 1,271 & 1,271 & 1,271 & \dots & 1,271 \\ 1,251 & 1,251 & 1,251 & 1,251 & \dots & 1,251 \\ 1,234 & 1,234 & 1,234 & 1,234 & \dots & 1,234 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1,295 & 1,295 & 1,295 & 1,295 & \dots & 1,234 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$\mathbf{H3} = \begin{bmatrix} 2,095 & 2,095 & 2,095 & 2,095 & \dots & 2,095 \\ 2,071 & 2,071 & 2,071 & 2,071 & \dots & 2,071 \\ 2,051 & 2,051 & 2,051 & 2,051 & \dots & 2,051 \\ 2,034 & 2,034 & 2,034 & 2,034 & \dots & 2,034 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 2,095 & 2,095 & 2,095 & 2,095 & \dots & 2,095 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

### 3.6.1 Analytické vyjádření přetvoření na segmentu 1

Na obrázku 3.15 je zobrazeno zatížení působící na půlku prvního segmentu. Moment  $M_x$  nebyl vůbec uvažován, protože vytváří pouze smykové napětí, které je pro měření přetvoření nepodstatné. Moment  $M_y$  byl nahrazen silami  $F_{x1}$ , což lépe vystihuje realitu.



Obr. 3.15 - Zatížení prvního deformačního segmentu

Velikost síly  $F_{x1}$  se vypočítá jako podíl ohybového momentu, který síla  $F_x$  vyvolává na osu segmentu a vzdálenosti od osy ke střednici, viz vzorec 3.15.

$$F_{x1} = \frac{F_x \cdot 21,5}{15 - h} = 1,56 \cdot F_x \quad (3.15)$$

Moment  $M_z$  vyvolává síla  $F_x$  a vypočítá se dle vztahu 3.16.

$$M_z = F_x \cdot 9,5 \quad (3.16)$$

Se znalostí všech sil a momentů již bylo možné vyjádřit výsledné vnitřní účinky pro vrchní část segmentu. Znaménka odpovídají konvenci uvolnění zprava.

$$\begin{aligned} N_x &= \frac{F_x}{2} - F_{x1} = -1,06 \cdot F_x \\ M_{o,z} &= -\frac{M_z}{2} + \frac{F_y}{2} \cdot R = 0,5 \cdot F_y \cdot R - 4,75 \cdot F_x \\ M_{o,y} &= -\frac{F_z}{2} \cdot R \end{aligned}$$



Z výsledných vnitřních účinků se vyjádřilo normálové napětí, viz vzorce 3.17 a 3.18.

$$\sigma_N = \frac{N}{S} \quad (3.17)$$

$$\sigma_O = \frac{M_O}{W_O} \quad (3.18)$$

, kde  $\sigma_N$  – tahové/tlakové normálové napětí [MPa]  
 $\sigma_O$  – ohybové normálové napětí [MPa]  
 $N$  – normálová síla [N]  
 $S$  – plocha příčného průřezu [m<sup>2</sup>]  
 $M_O$  – ohybový moment [Nm]  
 $W_O$  – modul průřezu v ohybu [m<sup>3</sup>]

$$\sigma_X^{N_x}(T1, T2) = \frac{N_x}{S} = \frac{-1,06 \cdot F_x}{b \cdot H12}$$

$$\sigma_X^{M_{o,z}}(T1) = \frac{M_{o,z}}{W_o} = \frac{0,5 \cdot F_y \cdot R - 4,75 \cdot F_x}{\frac{1}{12} \cdot b^3 \cdot H12} \cdot T$$

$$\sigma_X^{M_{o,z}}(T2) = \frac{M_{o,z}}{W_o} = \frac{-0,5 \cdot F_y \cdot R + 4,75 \cdot F_x}{\frac{1}{12} \cdot b^3 \cdot H12} \cdot T$$

$$\sigma_X^{M_{o,y}}(T1, T2) = \frac{M_{o,y}}{W_o} = \frac{-\frac{F_z}{2} \cdot R}{\frac{1}{12} \cdot b \cdot H12^3} \cdot \frac{-H12}{2} = \frac{3 \cdot F_z \cdot R}{b \cdot H12^2}$$

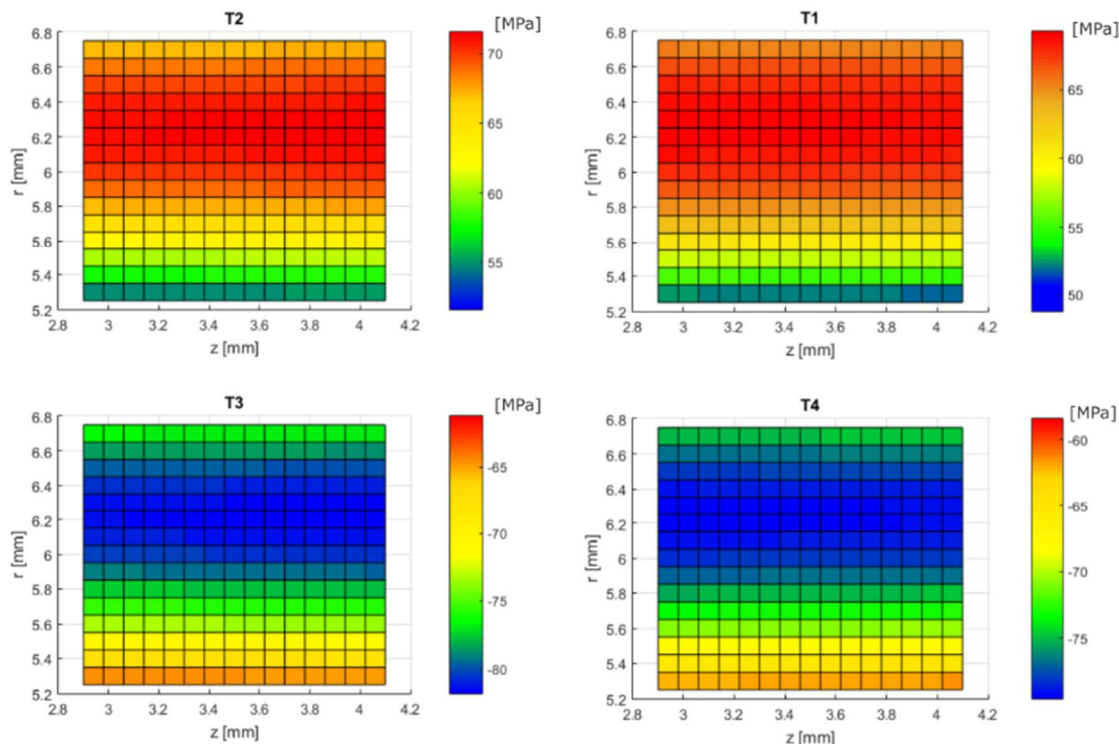
Pro tenzometry T1 a T2 jsou normálové složky napětí následující:

$$\begin{aligned} \sigma_X^{T1,T2} &= \sigma_X^N + \sigma_X^{M_{o,z}} + \sigma_X^{M_{o,y}} \\ \sigma_Y^{T1,T2} &= 0 \\ \sigma_Z^{T1,T2} &= 0 \end{aligned}$$

Pro druhou stranu segmentu, a tedy pro tenzometry T3 a T4 byl postup naprosto stejný. Všechna napětí vyšly naprosto stejně, jediná změna byla ta, že napětí  $\sigma_X^{M_{o,y}}$  vyšlo s opačným znaménkem. Pro tenzometry T3 a T4 jsou normálové složky napětí následující:

$$\begin{aligned} \sigma_X^{T3,T4} &= \sigma_X^N + \sigma_X^{M_{o,z}} - \sigma_X^{M_{o,y}} \\ \sigma_Y^{T3,T4} &= 0 \\ \sigma_Z^{T3,T4} &= 0 \end{aligned}$$

Jediná nenulová složka normálového napětí byla v ose X. Jelikož zde bylo počítáno s maticovým prostorem 16x16, k jedinému výpočtu bylo potřeba vyčíslit 256 rovnic pro každý tenzometr, což je dohromady 1024 rovnic. Tyto výpočty byly provedeny v programu MATLAB a na obrázku 3.16 je graficky zobrazen průběh normálového napětí pod tenzometry na prvním segmentu pro zatížení 100N v každé ose.



Obr. 3.16 - Průběh normálového napětí pod tenzometry

Přetvoření na každém tenzometru už se jen vypočítalo ze vztahu 3.19. Následně bylo nutné zjistit průměrnou hodnotu, viz rovnice 3.20.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (3.19)$$

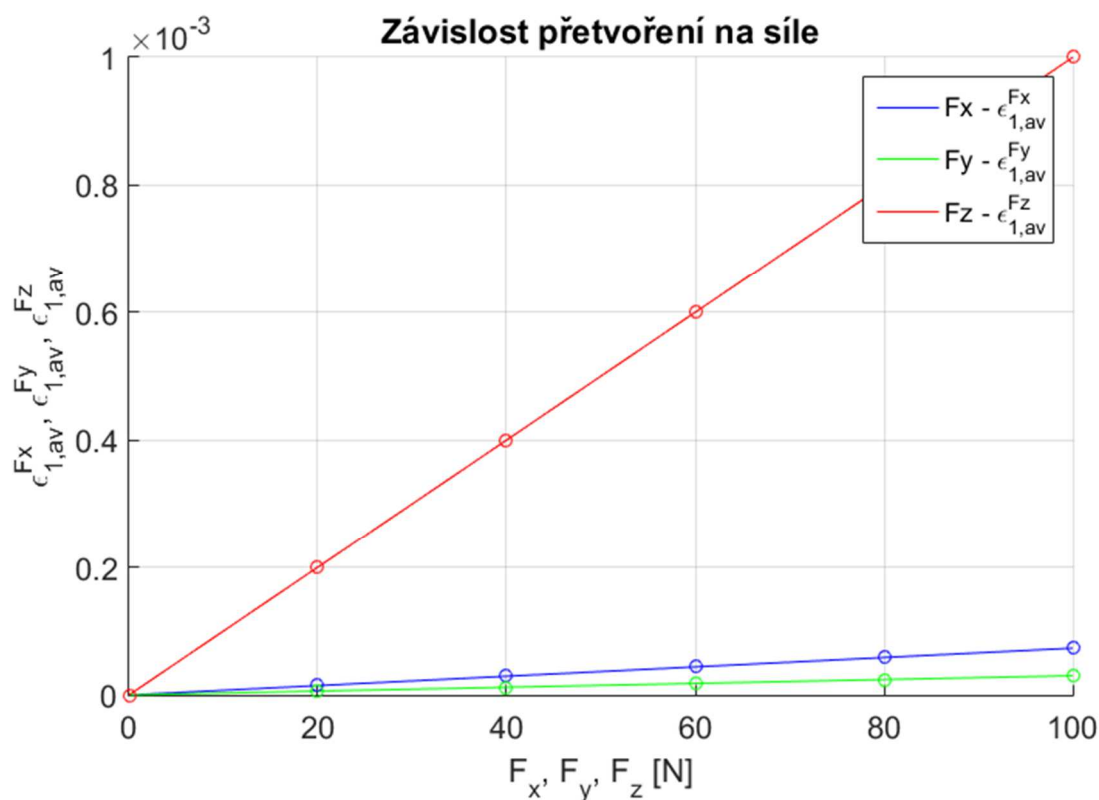
, kde  $\varepsilon$  – přetvoření [-]  
 $\sigma$  – normálové napětí [MPa]  
 $E$  – modul pružnosti [MPa]

$$\varepsilon_{1,av} = \frac{|\varepsilon_{av}^{T1}| + |\varepsilon_{av}^{T2}| + |\varepsilon_{av}^{T3}| + |\varepsilon_{av}^{T4}|}{4} \quad (3.20)$$

Jelikož je tenzometr integrátor a výstup je vždy průměr toho, co pod sebou naměří, je vždy nutné vzít průměrnou hodnotu ze všech 256 hodnot přetvoření v maticovém prostoru od všech tenzometrů. V tabulce 7 jsou zapsány výsledky výpočtů průměrného přetvoření pod tenzometry od každé síly zvlášť, aby bylo možné vyjádřit závislost přetvoření na každé síle samostatně.

Tab. 7 – Přetvoření na prvním segmentu

| $F_x$<br>[N] | $\varepsilon_{1,av}^{F_x}$<br>[-] | $F_y$<br>[N] | $\varepsilon_{1,av}^{F_y}$<br>[-] | $F_z$<br>[N] | $\varepsilon_{1,av}^{F_z}$<br>[-] |
|--------------|-----------------------------------|--------------|-----------------------------------|--------------|-----------------------------------|
| 0            | 0                                 | 0            | 0                                 | 0            | 0                                 |
| 20           | $1,4637 \cdot 10^{-5}$            | 20           | $6,0201 \cdot 10^{-6}$            | 20           | $2,0141 \cdot 10^{-4}$            |
| 40           | $2,9273 \cdot 10^{-5}$            | 40           | $1,2040 \cdot 10^{-5}$            | 40           | $4,0283 \cdot 10^{-4}$            |
| 60           | $4,3910 \cdot 10^{-5}$            | 60           | $1,8060 \cdot 10^{-5}$            | 60           | $6,0424 \cdot 10^{-4}$            |
| 80           | $5,8546 \cdot 10^{-5}$            | 80           | $2,4080 \cdot 10^{-5}$            | 80           | $8,0565 \cdot 10^{-4}$            |
| 100          | $7,3183 \cdot 10^{-5}$            | 100          | $3,0101 \cdot 10^{-5}$            | 100          | $10 \cdot 10^{-4}$                |



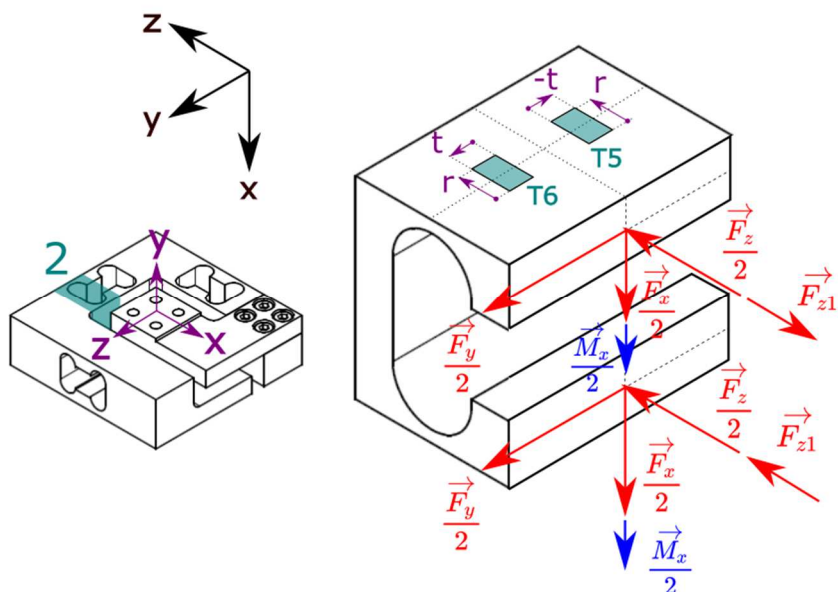
Obr. 3.17 - Závislost přetvoření na síle

Na obrázku 3.17 je grafické znázornění výsledů v tabulce 7. Dle předpokladu lineárně pružného materiálu je závislost lineární. Posledním krokem bylo vypočtení směrnic a konečného vyjádření přetvoření na prvním segmentu, viz vztah 3.21.

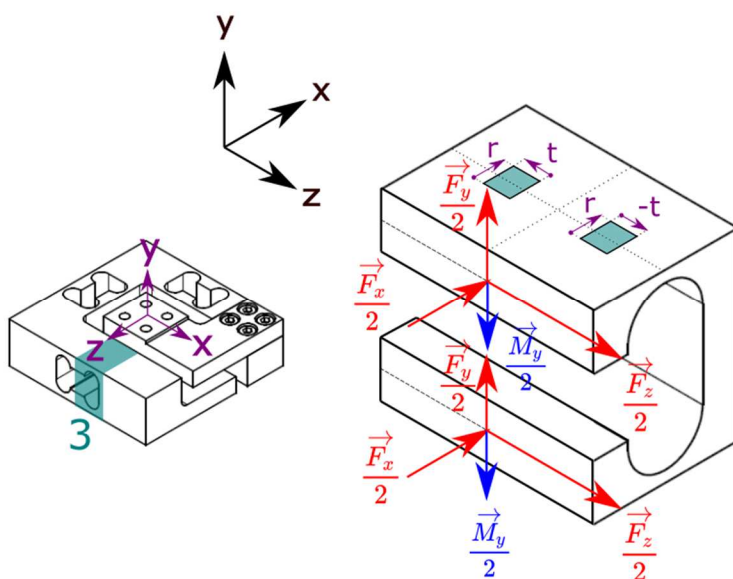
$$\varepsilon_1 = 7,31825 \cdot 10^{-7} \cdot F_x + 3,0101 \cdot 10^{-7} F_y + 1 \cdot 10^{-5} \cdot F_z \quad (3.21)$$

### 3.6.2 Analytické vyjádření přetvoření na segmentu 2 a 3

Na obrázku 3.18 je zobrazen druhý a na obrázku 3.19 třetí deformační segment snímače. Situace zde byla velmi podobná jako na prvním segmentu. Postup řešení byl naprosto shodný s prvním segmentem.



Obr. 3.18 – Zatížení druhého deformačního segmentu



Obr. 3.19 - Zatížení třetího deformačního segmentu

Rovnice přetvoření pro segmenty 2 a 3 vyšly následovně:

$$\varepsilon_2 = 1 \cdot 10^{-5} F_x + 3,0101 \cdot 10^{-7} F_y + 7,31825 \cdot 10^{-7} F_z \quad (3.22)$$

$$\varepsilon_3 = 9,5267 \cdot 10^{-7} F_x + 4,2 \cdot 10^{-6} F_y + 2,6586 \cdot 10^{-7} F_z \quad (3.23)$$

### 3.6.3 Analytické vyjádření sil

V předchozích kapitolách byly vyjádřeny vztahy pro přetvoření pro všechny deformační segmenty.

$$\varepsilon_1 = 7,31825 \cdot 10^{-7} \cdot F_x + 3,0101 \cdot 10^{-7} F_y + 1 \cdot 10^{-5} \cdot F_z \quad (3.21)$$

$$\varepsilon_2 = 1 \cdot 10^{-5} F_x + 3,0101 \cdot 10^{-7} F_y + 7,31825 \cdot 10^{-7} F_z \quad (3.22)$$

$$\varepsilon_3 = 9,5267 \cdot 10^{-7} F_x + 4,2 \cdot 10^{-6} F_y + 2,6586 \cdot 10^{-7} F_z \quad (3.23)$$

Ze vztahů 3.21 - 3.23 je vidět, že v každé rovnici jedna majoritní složka síly a ostatní jsou minoritní. V rovnici 3.21 je to složka  $F_z$ , v rovnici 3.22  $F_x$  a v rovnici 3.23 složka  $F_y$ . Ostatní složky bylo možné zanedbat a z nových rovnic šlo následně snadno vyjádřit síly  $F_x$ ,  $F_y$  a  $F_z$  z rovnic 3.24 - 3.26.

$$F_x = 10^5 \varepsilon_2 \quad (3.24)$$

$$F_y = \frac{\varepsilon_3}{4,2 \cdot 10^{-6}} \quad (3.25)$$

$$F_z = 10^5 \varepsilon_1 \quad (3.26)$$

Tohle zjednodušení bylo nutné z důvodu experimentálního měření a následné optimalizace těchto vztahů. V případě původních vztahů by tato optimalizace byla téměř nemožná. Že takové zjednodušení bylo možné a nemá výrazný vliv na výsledky dokazuje níže uvedený experiment.

Bylo náhodně zvoleno několik kombinací sil a tyto kombinace byly vloženy do programu pro výpočet přetvoření, ze kterého byly získány vztahy 3.21 - 3.23. Tohle přetvoření bylo následně dosazeno do vztahů 3.24 - 3.26 a výsledek byl porovnán se vstupem.

| Složky sil<br>[N]                       | Přetvoření<br>[-]  | Znovu vyjádření sil<br>[N]                       |
|---|--|--|
| $F_x = 15$<br>$F_y = 50$<br>$F_z = 70$  | $\varepsilon_1 = 7,0494 \cdot 10^{-4}$<br>$\varepsilon_2 = 1,5106 \cdot 10^{-4}$<br>$\varepsilon_3 = 2,1000 \cdot 10^{-4}$ | $F_x = 15,10$<br>$F_y = 50,00$<br>$F_z = 70,49$  |
| $F_x = 98$<br>$F_y = 20$<br>$F_z = 85$  | $\varepsilon_1 = 8,5600 \cdot 10^{-4}$<br>$\varepsilon_2 = 9,8692 \cdot 10^{-4}$<br>$\varepsilon_3 = 8,9014 \cdot 10^{-4}$ | $F_x = 98,69$<br>$F_y = 20,19$<br>$F_z = 85,60$  |
| $F_x = 75$<br>$F_y = 100$<br>$F_z = 10$ | $\varepsilon_1 = 1,0071 \cdot 10^{-4}$<br>$\varepsilon_2 = 7,5530 \cdot 10^{-4}$<br>$\varepsilon_3 = 4,2000 \cdot 10^{-4}$ | $F_x = 75,53$<br>$F_y = 100,00$<br>$F_z = 10,07$ |

Z porovnání zadaných a spočtených sil vyplývá, že odchylka je malá. Největší odchylka vyšla 0,7N. Taková odchylka nemá výrazný vliv na přesnost měření a bude eliminována optimalizací v experimentálním měření.

Při dosazení rovnic 3.24-3.26 do rovnic 3.2-3.4 vyjdou finální vztahy, kde jsou síly funkcí měřeného napětí.

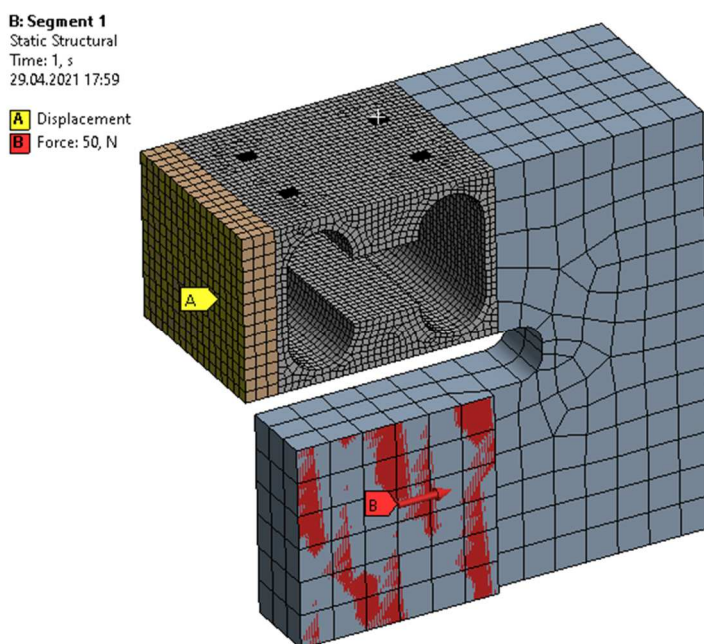
$$F_x = \frac{10^5 U_2}{U_z \cdot k_2} \quad (3.27)$$

$$F_y = \frac{U_3}{4,2 \cdot 10^{-6} \cdot U_z \cdot k_3} \quad (3.28)$$

$$F_z = \frac{10^5 U_1}{U_z \cdot k_1} \quad (3.29)$$

### 3.7. Numerické vyjádření sil $F_x$ , $F_y$ a $F_z$

Numerické vyjádření sil probíhalo ve své podstatě úplně stejně jako u analytického vyjádření. Opět bylo provedeno několik měření na každém segmentu. Pro přesný výpočet přetvoření bylo nutné velice zjemnit síť v oblasti tenzometrů a celého deformačního segmentu. Z tohoto důvodu již nebylo vhodné používat model celého snímače, ale byla použita jen část. Na obrázku 3.20 je vidět výřez snímače pro výpočet přetvoření na prvním segmentu.



Obr. 3.20 - Numerický model prvního segmentu

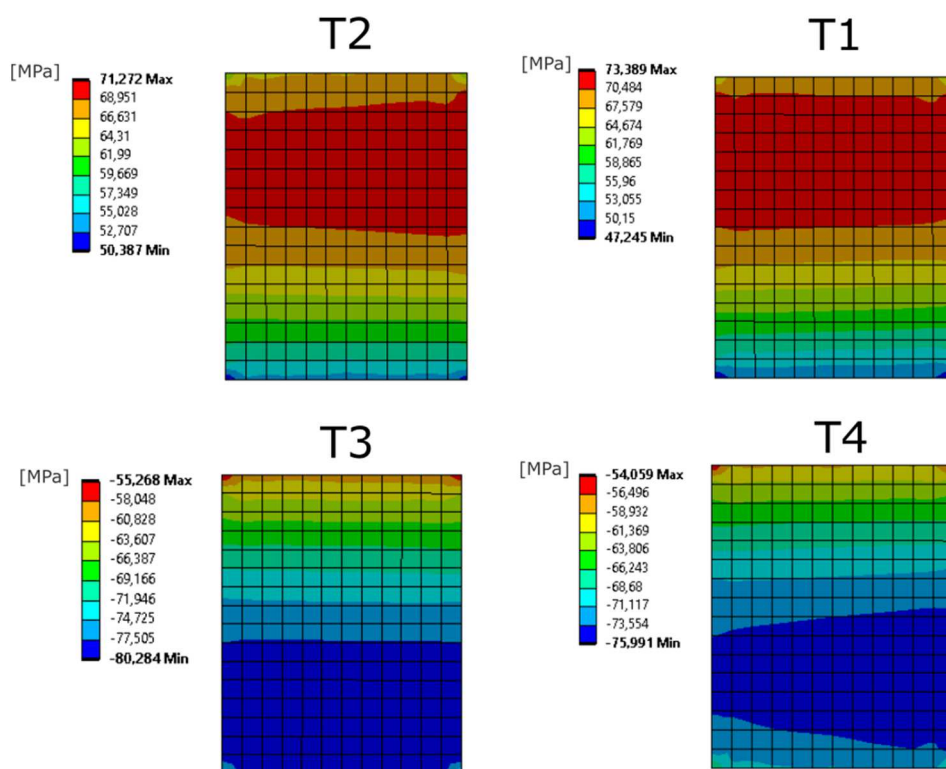
Okrajové podmínky byly nastaveny:

- a) Zamezení posuvů na žluté ploše A
- b) Síla na červené ploše B

Síť byla z většiny tvořena kvadratickými šestistěny o velikostech hrany:

- a) 1 mm na hnědém objemu u okrajové podmínky A
- b) 0,6 mm na šedém objemu(deformační segment)
- c) 0,1 mm na objemu pod tenzometry
- d) 3 mm na modrém objemu

Na obrázku 3.21 je zobrazen průběh normálového napětí pod tenzometry na prvním segmentu při zatížení 100N v každé ose.



Obr. 3.21 - Průběh normálového napětí pod tenzometry

V tabulce 8 jsou zapsány výsledky výpočtu průměrného přetvoření pod každým tenzometrem od každé složky síly zvlášť, aby bylo opět možné vyjádřit závislost přetvoření od každé složky síly zvlášť.

Tab. 8 – Závislost přetvoření na síle

| $F_x$<br>[N] | $\epsilon_{1,av}(T1)$<br>[-] | $\epsilon_{1,av}(T2)$<br>[-] | $\epsilon_{1,av}(T3)$<br>[-] | $\epsilon_{1,av}(T4)$<br>[-] |
|--------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 20           | $-1,1315 \cdot 10^{-5}$      | $-5,8824 \cdot 10^{-6}$      | $-6,9527 \cdot 10^{-6}$      | $-1,0817 \cdot 10^{-5}$      |
| 40           | $-2,2630 \cdot 10^{-5}$      | $-1,1965 \cdot 10^{-5}$      | $-1,3905 \cdot 10^{-5}$      | $-2,1634 \cdot 10^{-5}$      |
| 60           | $-3,3945 \cdot 10^{-5}$      | $-1,7647 \cdot 10^{-5}$      | $-2,0858 \cdot 10^{-5}$      | $-3,2450 \cdot 10^{-5}$      |

| $F_y$<br>[N] | $\epsilon_{1,av}(T1)$<br>[-] | $\epsilon_{1,av}(T2)$<br>[-] | $\epsilon_{1,av}(T3)$<br>[-] | $\epsilon_{1,av}(T4)$<br>[-] |
|--------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 20           | $3,1741 \cdot 10^{-6}$       | $-3,6381 \cdot 10^{-6}$      | $5,6937 \cdot 10^{-6}$       | $-4,7206 \cdot 10^{-6}$      |
| 40           | $6,3482 \cdot 10^{-6}$       | $-7,2762 \cdot 10^{-6}$      | $1,1387 \cdot 10^{-5}$       | $-9,4412 \cdot 10^{-6}$      |
| 60           | $9,5223 \cdot 10^{-6}$       | $-1,0914 \cdot 10^{-5}$      | $1,7081 \cdot 10^{-5}$       | $-1,4161 \cdot 10^{-5}$      |

| $F_z$<br>[N] | $\epsilon_{1,av}(T1)$<br>[-] | $\epsilon_{1,av}(T2)$<br>[-] | $\epsilon_{1,av}(T3)$<br>[-] | $\epsilon_{1,av}(T4)$<br>[-] |
|--------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 20           | $1,7285 \cdot 10^{-4}$       | $1,7755 \cdot 10^{-4}$       | $-1,7658 \cdot 10^{-4}$      | $-1,7151 \cdot 10^{-4}$      |
| 40           | $3,4570 \cdot 10^{-4}$       | $3,5510 \cdot 10^{-4}$       | $-3,5316 \cdot 10^{-4}$      | $-3,4302 \cdot 10^{-4}$      |
| 60           | $5,1855 \cdot 10^{-4}$       | $5,3265 \cdot 10^{-4}$       | $-5,2974 \cdot 10^{-4}$      | $-5,1453 \cdot 10^{-4}$      |



Z tabulky 8 lze opět vidět, že se jednalo o lineární závislost. Dalším krokem byl výpočet průměrného přetvoření ze všech tenzometrů pomocí rovnice 3.20. Posledním krokem bylo opět vyjádření směrnic a celkového vztahu pro přetvoření na prvním segmentu, viz rovnice 3.30.

$$\varepsilon_1 = 4,3833 \cdot 10^{-7} F_x + 2,1532 \cdot 10^{-7} F_y + 8,7311 \cdot 10^{-6} F_z \quad (3.30)$$

Rovnice pro přetvoření pro ostatní 2 segmenty byly získány stejným způsobem jako pro segment 1.

$$\varepsilon_2 = 8,6993 \cdot 10^{-6} F_x + 2,1291 \cdot 10^{-7} F_y + 4,3771 \cdot 10^{-7} F_z \quad (3.31)$$

$$\varepsilon_3 = 3,8448 \cdot 10^{-7} F_x + 3,5879 \cdot 10^{-6} F_y + 4,8474 \cdot 10^{-8} F_z \quad (3.32)$$

Stejně jako u analytického vyjádření byly zanedbány minoritní složky sil a výsledné vztahy pro síly jsou vypsány níže jako vztahy 3.33-3.35.

$$F_x = 114\,952 \varepsilon_2 \quad (3.33)$$

$$F_y = 278\,715 \varepsilon_3 \quad (3.34)$$

$$F_z = 114\,533 \varepsilon_1 \quad (3.35)$$

Při dosazení rovnic 3.33-3.35 do rovnic 3.2-3.4 vyjde finální vztah, kde jsou síly funkcí měřeného napětí.

$$F_x = \frac{114\,952 \cdot U_2}{U_z \cdot k_2} \quad (3.36)$$

$$F_y = \frac{278\,715 \cdot U_3}{U_z \cdot k_3} \quad (3.37)$$

$$F_z = \frac{114\,533 \cdot U_1}{U_z \cdot k_1} \quad (3.38)$$

### 3.8. Porovnání analytického a numerického vyjádření sil

V předchozích kapitolách byly vyjádřeny jak analytické, tak numerické vztahy pro výpočet sil z přetvoření, viz vztahy 3.24-3.26 a 3.33-3.35.

$$F_x^{ANAL.} = 10^5 \varepsilon_2 \quad (3.24)$$

$$F_y^{ANAL.} = \frac{\varepsilon_3}{4,2 \cdot 10^{-6}} \quad (3.25)$$

$$F_z^{ANAL.} = 10^5 \varepsilon_1 \quad (3.26)$$

$$F_x^{NUM.} = 114\,952 \varepsilon_2 \quad (3.33)$$

$$F_y^{NUM.} = 278\,715 \varepsilon_3 \quad (3.24)$$

$$F_z^{NUM.} = 114\,533 \varepsilon_1 \quad (3.35)$$

Tab. 9 – Porovnání analytické a numerické metody

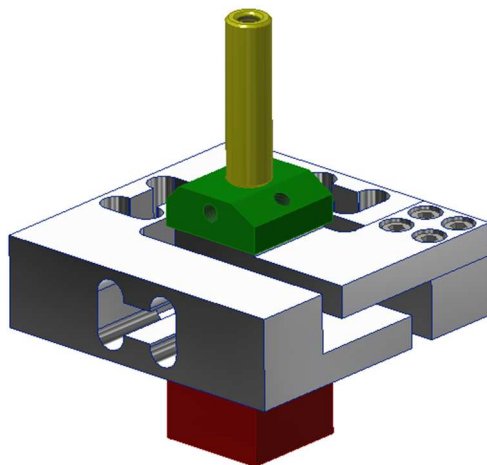
| Přetvoření<br>[-] · 10 <sup>-4</sup>                                  | Analytické vztahy    |                      |                      | Numerické vztahy    |                     |                     | Rozdíl              |                     |                     |
|---|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|   | $F_x^{ANAL.}$<br>[N] | $F_y^{ANAL.}$<br>[N] | $F_z^{ANAL.}$<br>[N] | $F_x^{NUM.}$<br>[N] | $F_y^{NUM.}$<br>[N] | $F_z^{NUM.}$<br>[N] | $\Delta F_x$<br>[N] | $\Delta F_y$<br>[N] | $\Delta F_z$<br>[N] |
| $\varepsilon_1 = 1,2$<br>$\varepsilon_2 = 4,2$<br>$\varepsilon_3 = 3$ | 42,00                | 71,43                | 12,00                | 48,28               | 83,61               | 13,74               | 6,28                | 12,18               | 1,74                |
| $\varepsilon_1 = 5$<br>$\varepsilon_2 = 0,8$<br>$\varepsilon_3 = 3,5$ | 8,00                 | 83,33                | 50,00                | 9,19                | 97,55               | 57,26               | 1,19                | 14,22               | 7,26                |
| $\varepsilon_1 = 3,1$<br>$\varepsilon_2 = 5,6$<br>$\varepsilon_3 = 1$ | 56,00                | 23,81                | 31,00                | 64,37               | 27,87               | 35,51               | 8,37                | 4,06                | 4,51                |

Z porovnání analytické a numerické metody v tabulce 9 plyne, že odchylka je poměrně velká a může být až 15 N. Lze si také povšimnout, že se zvyšujícím se přetvoření se zvyšuje i odchylka. Zda chyba vznikla v analytické či numerické metodě potvrdí experiment, lze však předpokládat, že chyba bude v analytické metodě a vznikla kvůli složité geometrii.

## 4. Experimentální část

### 4.1. Popis experimentu

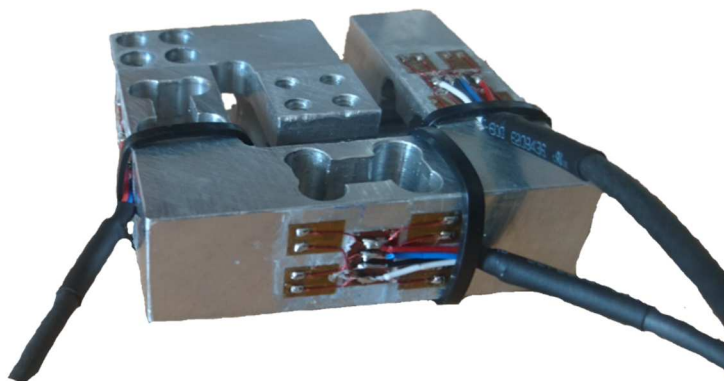
Pro potvrzení či vyvrácení předešlých výpočtů byl navržen experiment, při kterém měla být ověřena správnost funkčnosti snímače. Byl vyroben prototyp snímače a tři upínací přípravky viz obrázek 4.1.



Obr. 4.1 - Upínací přípravky

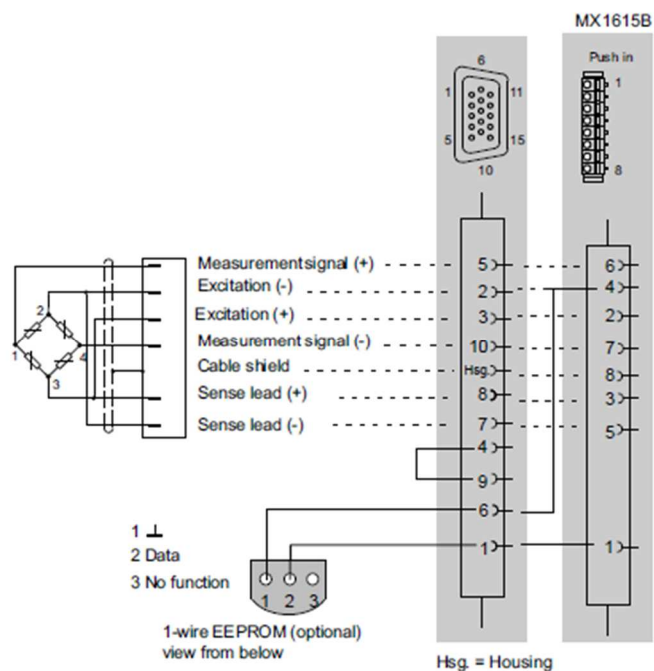
Červený přípravek sloužil k upnutí snímače do svěráku, čímž se zamezil posuv snímače. Zelený přípravek byl připevněn k druhé straně snímače a sloužil k upnutí žlutého přípravku, ke kterému se přišrouboval háček. Na tento háček se nakonec pověsilo závaží o známé hmotnosti. Zelený přípravek byl opatřen dvěma sraženými hranami, jedna pod úhlem  $45^\circ$  a druhá pod úhlem  $30^\circ$ , aby bylo možné i základní měření šikmých sil.

Zapojení tenzometrů proběhlo dle kapitoly 3.4 a na obrázku 4.2 je zobrazen prototyp snímače.



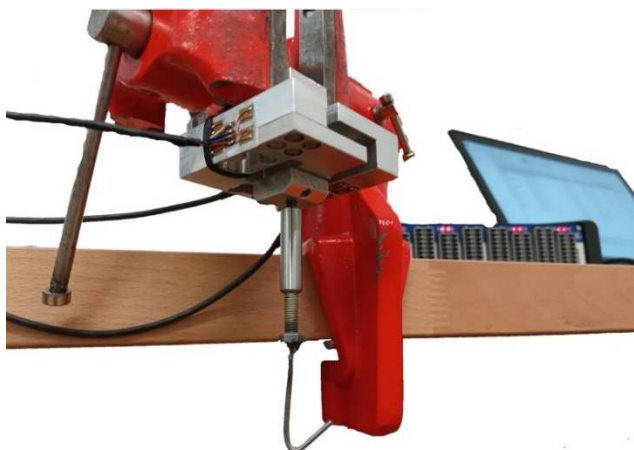
Obr. 4.2 - Prototyp snímače

K měření byl použit zesilovač MX1615B od firmy HBM. Měření probíhalo v softwaru CATMAN. Zapojení do zesilovače je zobrazeno na obrázku 4.3. Budící napětí bylo voleno dle výrobce 2,5V.



Obr. 4.3 - Schéma zapojení [7]

Na obrázku 4.4 je zobrazeno měření síly v ose Y a na obrázku 4.5 měření šikmé síly, pod úhlem 45°.



Obr. 4.4 - Měření síly v ose Y



*Obr. 4.5 - Měření šikmé síly*

U všech měření bylo nutné správně natočit svěrák tak, aby byl držák háčku vertikálně, jinak by závaží vytvářelo kroutící moment, který by mohl snímač a hlavně upínací přípravky poškodit.

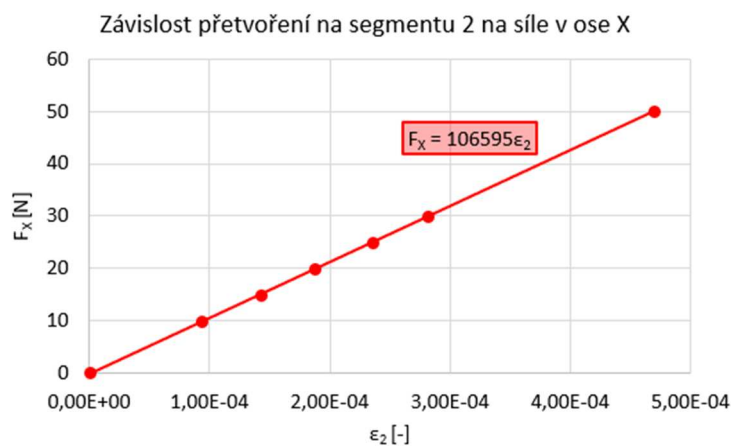
## 4.2. Výsledky experimentu

Měření přetvoření bylo dynamické a každé měření se skládalo z následujících částí:

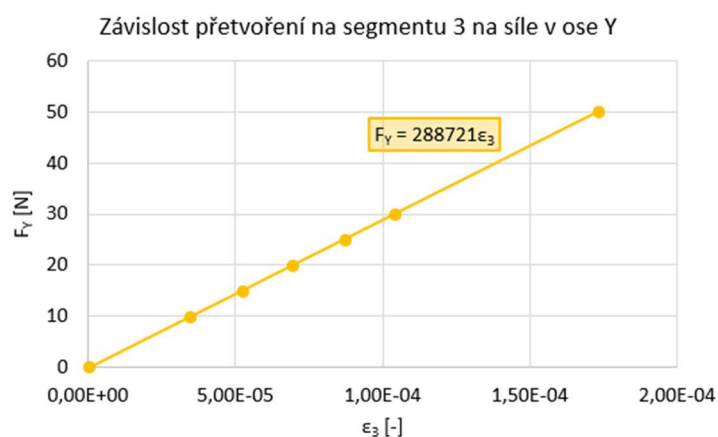
- 1) Spuštění měření
- 2) Zatížení snímače
- 3) Vlastní měření (cca 20 sekund)
- 4) Ukončení měření

Vzorkování bylo nastaveno na 10 Hz. Při délce měření 20 sekund byl tedy výstup 200 hodnot přetvoření. Z těchto hodnot byla vždy vybrána průměrná hodnota. Tyto hodnoty byly vyneseny do grafů 4.6–4.8 a naměřené hodnoty byly proloženy přímkou.

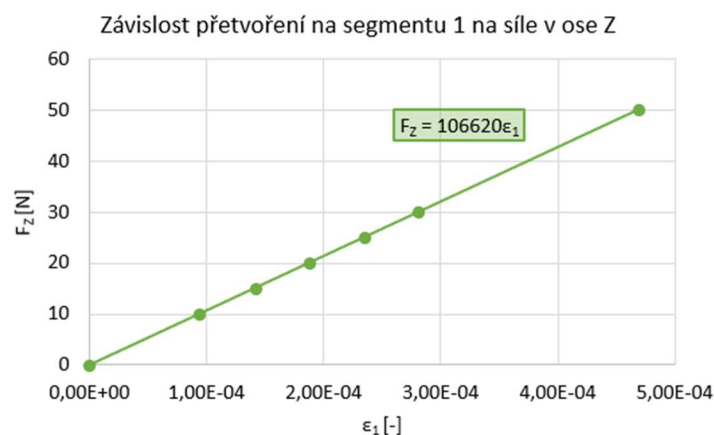
Z měření vyplynulo, že při měření síly v jedné ose zde bylo jedno přetvoření majoritní a ostatní 2 zanedbatelné, stejně jako u analytického a numerického vyjádření.



Obr. 4.6 - Závislost přetvoření na segmentu 2 na síle v ose X



Obr. 4.7 - Závislost přetvoření na segmentu 3 na síle v ose Y



Obr. 4.8 - Závislost přetvoření na segmentu 1 na síle v ose Z

Z grafických závislostí je na první pohled vidět, že bylo měření správné, protože má naprosto lineární průběh. Rovnice 4.1-4.3 jsou výstupem experimentu.

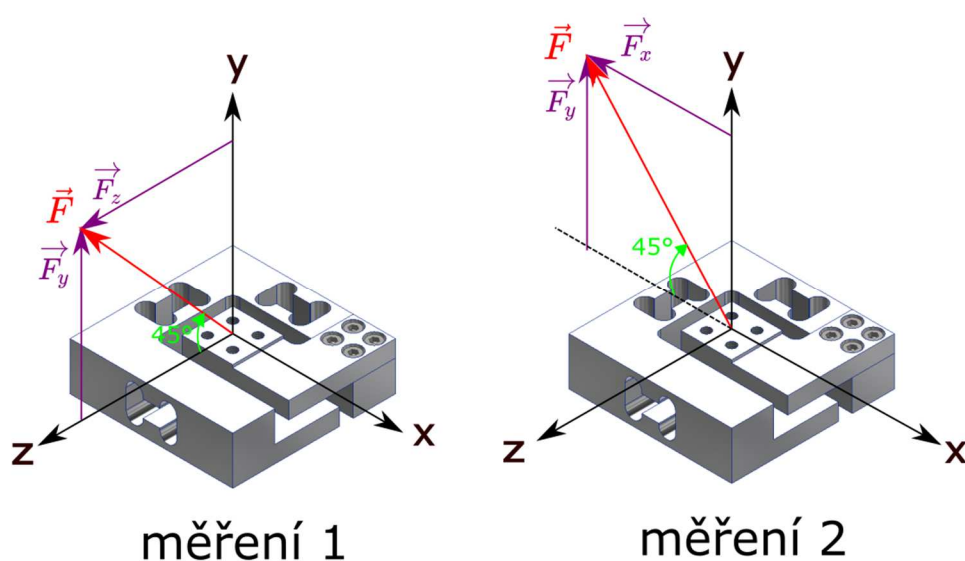
$$F_x = 106595\epsilon_2 \quad (4.1)$$

$$F_y = 288721\epsilon_3 \quad (4.2)$$

$$F_z = 106620\epsilon_1 \quad (4.3)$$

Z těchto vztahů je vidět, že směrnice pro síly  $F_x$  a  $F_z$  jsou téměř totožné. Vztah pro sílu  $F_y$  má směrnici jinou, to je zapříčiněné jinou výškou příčného průřezu segmentu 3. Kdyby měly všechny segmenty stejnou výšku příčného segmentu, byly by směrnice stejné u všech vztahů.

Součástí experimentu byly i 2 základní měření šikmých sil, aby mohla být potvrzena správnost měření snímače i při zatížení šikmou silou. Upínací přípravek byl konstruován na rozložení síly pouze do dvou os. Pro rozklad sil do tří os by musel být zkonstruován důmyslnější přípravek. První měření probíhalo při zatížení silou o osách Y a Z a druhé měření při zatížení silou v osách Y a X. V obou případech síla působila po úhlem  $45^\circ$ . Silové působení je zobrazeno na obrázku 4.9.



Obr. 4.9 - Měření šikmých sil

Níže jsou uvedeny výsledky dvou šikmých měření.

### Měření 1

| Silové zatížení | Změřené přetvoření                    | Změřená síla   | Odchylka měření      |
|-----------------|---------------------------------------|----------------|----------------------|
| $F_X = 0N$      | $\varepsilon_2 = 2 \cdot 10^{-6}$     | $F_X = 0,21N$  |                      |
| $F_Y = 7,07 N$  | $\varepsilon_3 = 2,295 \cdot 10^{-5}$ | $F_Y = 6,62N$  | $\Delta F_y = 6,3\%$ |
| $F_Z = 7,07 N$  | $\varepsilon_1 = 6,75 \cdot 10^{-5}$  | $F_Z = 7,19N$  | $\Delta F_z = 1,6\%$ |
| $F_X = 0N$      | $\varepsilon_2 = 3,6 \cdot 10^{-6}$   | $F_X = 0,38N$  |                      |
| $F_Y = 14,14 N$ | $\varepsilon_3 = 4,723 \cdot 10^{-5}$ | $F_Y = 13,63N$ | $\Delta F_y = 3,6\%$ |
| $F_Z = 14,14 N$ | $\varepsilon_1 = 1,348 \cdot 10^{-4}$ | $F_Z = 14,37N$ | $\Delta F_z = 1,6\%$ |
| $F_X = 0N$      | $\varepsilon_2 = 5,2 \cdot 10^{-6}$   | $F_X = 0,55N$  |                      |
| $F_Y = 21,21N$  | $\varepsilon_3 = 7,155 \cdot 10^{-5}$ | $F_Y = 20,65N$ | $\Delta F_y = 2\%$   |
| $F_Z = 21,21N$  | $\varepsilon_1 = 2,023 \cdot 10^{-4}$ | $F_Z = 21,56N$ | $\Delta F_z = 1,6\%$ |
| $F_X = 35,35N$  | $\varepsilon_2 = 8 \cdot 10^{-6}$     | $F_X = 0,85N$  |                      |
| $F_Y = 35,35N$  | $\varepsilon_3 = 1,2 \cdot 10^{-4}$   | $F_Y = 34,64N$ | $\Delta F_y = 2\%$   |
| $F_Z = 35,35N$  | $\varepsilon_1 = 3,36 \cdot 10^{-4}$  | $F_Z = 35,82N$ | $\Delta F_z = 1,3\%$ |

### Měření 2

| Silové zatížení | Změřené přetvoření                     | Změřená síla    | Odchylka měření      |
|-----------------|--|-----------------|----------------------|
| $F_X = -7,07N$  | $\varepsilon_2 = -6,66 \cdot 10^{-5}$  | $F_X = -7,09N$  | $\Delta F_x = 0,2\%$ |
| $F_Y = 7,07 N$  | $\varepsilon_3 = 2,315 \cdot 10^{-5}$  | $F_Y = 6,67N$   | $\Delta F_y = 5,6\%$ |
| $F_Z = 0N$      | $\varepsilon_1 = 3 \cdot 10^{-7}$      | $F_Z = 0,03N$   |                      |
| $F_X = -14,14N$ | $\varepsilon_2 = -1,317 \cdot 10^{-4}$ | $F_X = -14,03N$ | $\Delta F_x = 0,7\%$ |
| $F_Y = 14,14 N$ | $\varepsilon_3 = 4,645 \cdot 10^{-5}$  | $F_Y = 13,41N$  | $\Delta F_y = 5,1\%$ |
| $F_Z = 0 N$     | $\varepsilon_1 = 1,7 \cdot 10^{-6}$    | $F_Z = 0,18N$   |                      |
| $F_X = -21,21N$ | $\varepsilon_2 = -1,981 \cdot 10^{-4}$ | $F_X = -21,11N$ | $\Delta F_x = 0,5\%$ |
| $F_Y = 21,21N$  | $\varepsilon_3 = 7,043 \cdot 10^{-5}$  | $F_Y = 20,33N$  | $\Delta F_y = 4,1\%$ |
| $F_Z = 0N$      | $\varepsilon_1 = 2,5 \cdot 10^{-6}$    | $F_Z = 0,26N$   |                      |
| $F_X = -35,35N$ | $\varepsilon_2 = -3,3 \cdot 10^{-4}$   | $F_X = -35,17N$ | $\Delta F_x = 0,5\%$ |
| $F_Y = 35,35N$  | $\varepsilon_3 = 1,191 \cdot 10^{-4}$  | $F_Y = 34,38N$  | $\Delta F_y = 2,7\%$ |
| $F_Z = 0N$      | $\varepsilon_1 = 4 \cdot 10^{-6}$      | $F_Z = 0,42N$   |                      |
| $F_X = -70,7N$  | $\varepsilon_2 = -6,61 \cdot 10^{-4}$  | $F_X = -70,45N$ | $\Delta F_x = 0,3\%$ |
| $F_Y = 70,7N$   | $\varepsilon_3 = 2,432 \cdot 10^{-4}$  | $F_Y = 70,21N$  | $\Delta F_y = 0,7\%$ |
| $F_Z = 0N$      | $\varepsilon_1 = 7,5 \cdot 10^{-6}$    | $F_Z = 0,79N$   |                      |

Z výsledků experimentu je vidět, že nepřesnost měření se pohybuje pod 5%. Výjimkou je zatížení osy Y do 20N, kde může být odchylka větší. Obecně se měření považuje za přesné, pokud je nepřesnost měření do 5-ti procent. Lze tedy říct, že snímač pracuje správně.



### 4.3. Porovnání experimentu s výpočty

Nejvhodnějším zhodnocením je porovnání směrnic finálních vztahů analytického, numerického a experimentálního řešení.

| Analyticky                    | Numericky                     | Experimentálně                |
|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| $F_x = 100\,000\varepsilon_2$ | $F_x = 114\,952\varepsilon_2$ | $F_x = 106\,595\varepsilon_2$ |
| $F_y = 238\,095\varepsilon_3$ | $F_y = 278\,715\varepsilon_3$ | $F_y = 288\,721\varepsilon_3$ |
| $F_z = 100\,000\varepsilon_1$ | $F_z = 114\,533\varepsilon_1$ | $F_z = 106\,620\varepsilon_1$ |

Jak je vidět ze vztahů uvedených výše, u sil  $F_x$  a  $F_z$  jsou směrnice téměř stejné, což je dáno stejnou výškou příčného průřezu. Směrnice experimentálního měření těchto sil je přesně mezi analytickým a numerickým řešením. Lze tedy říct, že obě metody zde byly stejně přesné. U vztahů pro  $F_y$  se směrnice experimentálního měření mnohem více blíží k numerickému řešení. Chyba nejspíše vznikla kvůli složité geometrii snímače

## 5. Závěr

Bakalářská práce se zabývala návrhem snímače schopného měřit sílu ve třech na sebe kolmých osách. Byly nastíněny dvě možné varianty konstrukce, ze kterých byla zvolena konstrukce snímače složeného ze dvou kusů. Výhoda této konstrukce spočívala v jednodušší výrobě a v tom, že nebyly nijak omezeny celkové rozměry, což znamenalo, že byla konstrukce vhodná i pro měření větších sil. V případě materiálu snímače se rozhodovalo mezi hliníkovou slitinou a běžnými konstrukčními oceli. Nakonec byla zvolena hliníková slitina EN AW6063 T66. Tato hliníková slitina má výhodu výborné obrobitelnosti a nižší hustoty než u ocelí, což znamená nižší váhu. Jediná nevýhoda této slitiny je vyšší cena než u běžných konstrukčních ocelí.

Nejdůležitější kapitolou práce byla optimalizace a nalezení výrobních tolerancí důležitých rozměrů snímače. Ze všech rozměrů snímače bylo důležité optimalizovat jen tři rozměry na každém deformačním segmentu. Tyto rozměry byly výška a šířka deformačního segmentu v nejužším místě segmentu a také rozteč drážek. Výška a šířka deformačního segmentu ovlivňovaly normálové i redukované napětí v nejužším místě segmentu tím, že zmenšovaly příčný průřez. Rozteč drážek ovlivňovala napětí tím, že zvyšovala ohybový moment. Bylo rozhodnuto, že se snímač bude dimenzovat k součiniteli bezpečnosti k meznímu stavu pružnosti 2, což znamenalo možnost přetížitelnosti o 100% bez jakéhokoliv poškození. Segmenty 1 a 2 měly všechny rozměry stejné, ale u segmentu 3 musela být zvýšena výška příčného průřezu kvůli vysokému redukovanému napětí ve třetím segmentu.

Co se týče tenzometrického zapojení, bylo zvoleno, že se bude jednat o zapojení do plného Wheatstonova můstku. Na každém deformačním segmentu byla instalována jedna sada čtyřech lineárních tenzometrů LY41-1,5/120 od firmy HBM.

Vyjádření finálních vztahů pro síly jako funkci přetvoření bylo provedeno jak analyticky, tak numericky. Každá složka síly byla vyjádřena jako funkce všech tří přetvoření, nicméně dvě ze tří složek přetvoření byly vždy minoritní a byly zanedbány. Bylo experimentálně ověřeno, že toto zjednodušení nemá výrazný vliv na výsledky. Analytické a numerické vztahy se lišily, při maximální síle v ose 100N se výsledky lišily i o 15N. Tato odchylka je velká, nicméně vzhledem ke složitosti geometrie snímače takový výsledek není až tak špatný.

Poslední část práce se zabývala experimentálním měření. Testování probíhalo zavěšováním závaží o známé hmotnosti na háček, který byl pomocí upínacího přípravku připevněn ke snímači, zatím co snímač samotný byl přes další upínací přípravek upnut v dílenském svěráku. První část měření se zabývala měření sil jen v jedné ose, aby mohly být stanoveny vztahy pro výpočet sil. Další částí měření bylo měření šikmých sil, kde byla potvrzena správná funkčnost snímače. Vztahy u prvních dvou segmentů získané pomocí experimentálního měření byly přesně mezi vztahy analytickými a numerickými. To tedy znamenalo, že u prvních dvou segmentů byl analytický i numerický výpočet stejně přesný. U třetího segmentu se vztah získaný experimentálně blížil spíše ke vztahu získaného numericky. Chyba analytického výpočtu byla nejspíše způsobena složitou geometrií.

## 6. Seznam použité literatury

- [1] JANÍČEK, Přemysl, Emanuel ONDRÁČEK, Jan VRBKA a Jiří BURŠA. *Mechanika těles: pružnost a pevnost I*. Brno: CERM, 2004, 287 stran : obrázky (černobílé). ISBN 80-214-2592-X.
- [2] BORESI, Arthur P. a Richard J. SCHMIDT. *Advanced mechanics of materials*. 6th ed. Hoboken: John Wiley, 2003, 610 stran. ISBN 978-0-471-43881-6.
- [3] HOFFMANN, Karl. *An Introduction to Measurements using Strain Gages*. Darmstadt: Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, 273 stran.
- [4] HOFMANN, Karl. *Applying the Wheatstone Bridge Circuit*. Darmstadt: Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, 36 stran.
- [5] HUNT, Andy. *Guide to the Measurement of Force*. London: Institute of Measurement and Control, 1998. ISBN 0904457281.
- [6] LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. Úvaly: Albra, 2003, xv, 865 s. : il. ; 22 cm. ISBN 80-86490-74-2.
- [7] Catman operating manual form HBM. Darmstadt: Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, 2020, 766 stran.
- [8] *Strain Gauges* [online], [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: <https://www.hbm.cz/wp-content/uploads/S01265.pdf>
- [9] *Nástroje a technologie*, 2015, K-TOOLS [online], [cit. 2021-04-01]. Dostupné z: <http://www.k-tools.cz/aktuality/20150924154452.pdf>
- [10] Přehled vlastností oceli S235JR [online], [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: <https://bbolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/tycove-oceli-uhlikove-konstrukcni-a-legovane/nelegovane-konstrukcni-oceli-podle-en-10025/prehled-vlastnosti-oceli-s235jrdrive-s235jrg>
- [11] Přehled vlastností oceli S355JR2 [online], [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/84823/F2-BP-2019-Spernak-Michal-priloha-Priloha%201.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>
- [12] Alloy data sheet EN-AW 6063[AlMg0.7Si] [online], [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: <https://www.nedal.com/wp-content/uploads/2017/11/Nedal-alloy-Datasheet-EN-AW-6063.pdf>
- [13] Material No.: 1.4301 [online], [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: <https://woite-edelstahl.com/14301en.html>

## 7. Seznam příloh

|    | Druh dokumentu   | Název dokumentu         |
|----|------------------|-------------------------|
| 1. | Výrobní výkres   | S-001-Snímač 1          |
| 2. | Výrobní výkres   | S-002-Snímač 2          |
| 3. | Výkres sestavení | S-S001-Snímač           |
| 4. | Výrobní výkres   | P-001-Držák háčku       |
| 5. | Výrobní výkres   | P-002-Upínací kostka    |
| 6. | Výrobní výkres   | P-003-Zatěžovací kostka |